



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Departamento de Producción Vegetal

Uso de Indicadores del Estado Hídrico de la Planta para la Optimización del Riego en Cultivos Leñosos

Tesis Doctoral

Presentada por

Elisa Pagán Rubio

Ingeniera Agrónoma

Dirigida por

Alejandro Pérez Pastor y Rafael Domingo Miguel

2012

La ingeniera agrónoma Elisa Pagán Rubio ha disfrutado durante la realización de su Tesis Doctoral de una beca de investigación asociada a proyectos de I+D, innovación y transferencia de tecnología entre Centros de Investigación (UPCT) y empresas (Agrícola Rafer SL) de la Fundación Séneca (Agencia Regional de Ciencia y Tecnología de Murcia), subvencionada por el Servicio Regional de Empleo y Formación y cofinanciada por el Fondo Social Europeo a través del Programa Operativo Integrado para la Región de Murcia. La parte experimental de la presente Memoria de Tesis se ha desarrollado en el marco de los siguientes proyectos de investigación: *Elaboración de protocolos de programación del riego en cítricos en función de parámetros de estrés hídrico en planta* (03102/PI/05) y *Mejora de la calidad del fruto y de la productividad del agua en fruticultura. Utilización de sensores en el continuo suelo-planta-atmósfera* (08845/PI/08), financiados por la Fundación Séneca, y *Programación de riego basado en medidas en planta en almendro, ciruelo y clementino* (CICYT/FEDER AGL2004-07940-C03-03/AGR) y *Optimización del riego deficitario controlado en almendros a través de la programación con dendrómetros* (AGL2007-66279-C03-03/AGR), financiados por el Ministerio de Educación y Ciencia.



**CONFORMIDAD DE SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN DE DEPÓSITO DE
TESIS DOCTORAL POR EL/LA DIRECTOR/A DE LA TESIS**

D./D^a. ALEJANDRO PÉREZ PASTOR y RAFAEL DOMINGO MIGUEL Directores de la Tesis doctoral “Uso de indicadores del estado hídrico de la planta para la optimización del riego en cultivos leñosos”

INFORMAN:

Que la referida Tesis Doctoral, ha sido realizada por D./D^a. ELISA PAGÁN RUBIO, dando su conformidad para que sea presentada ante la Comisión de Doctorado.

La rama de conocimiento por la que esta tesis ha sido desarrollada es:

Ciencias
Ciencias Sociales y Jurídicas
☒ Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 13 de febrero de 2012

LOS/LAS DIRECTORES/AS DE LA TESIS

Fdo.: ALEJANDRO PÉREZ PASTOR

Fdo.: RAFAEL DOMINGO MIGUEL

COMISIÓN DE DOCTORADO



CONFORMIDAD DE DEPOSITO DE TESIS DOCTORAL
POR LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA

D/D^a. FRANCISCO ARTÉS HERNÁNDEZ, Presidente/a de la Comisión Académica del Programa TÉCNICAS AVANZADAS EN INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO AGRARIO Y ALIMENTARIO.

INFORMA:


Que la Tesis Doctoral titulada, "*Uso de indicadores del estado hídrico de la planta para la optimización del riego en cultivos leñosos*", ha sido realizada por D^a. ELISA PAGÁN RUBIO, bajo la dirección y supervisión de los Dres. Alejandro Pérez Pastor y Rafael Domingo Miguel, dando su conformidad a la misma la Comisión Académica, con la finalidad de que sea presentada ante la Comisión de Doctorado.

La Rama de conocimiento por la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- ☐ Ciencias
- ☐ Ciencias Sociales y Jurídicas
- ☒ Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 13 de febrero de 2012

EL PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA


Fdo.: Francisco Artés Hernández

COMISIÓN DE DOCTORADO

AGRADECIMIENTOS

Esta Tesis Doctoral es el resultado del esfuerzo y dedicación de mucha gente. Algunos han puesto a mi disposición medios, conocimiento, tiempo y esfuerzo, otros, ánimo y cariño y en ocasiones hasta una mano tendida para ayudarme a levantarme. Por ello, quisiera mostrar mi más sincero agradecimiento:

A los Dres. Alejandro Pérez Pastor y Rafael Domingo Miguel por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo, poniendo a mi disposición todos los medios necesarios para llevarlo a cabo. Por sus consejos y enseñanzas así como por su dedicación, a veces a horas intempestivas, que me han permitido aprender y alcanzar metas. Por su calidad humana y su amistad.

A M^a Rosario Conesa Saura, Charo, mi amiga, que me ha ayudado en la realización de esta Tesis, tanto físicamente como moralmente, con nuestros viajes al campo, cafés y conversaciones que han hecho que mi tiempo en la UPCT haya sido algo más que trabajo.

A Juan Miguel Robles García e Isabel García Oller, que estuvieron a mi lado y tanto me ayudaron en la realización de las medidas en campo.

A Manuel Sánchez, del IMIDA, que me ayudó a poner a punto las sondas de succión.

A mis compañeros del grupo de investigación Suelo-Agua-Planta, Gregorio Egea, Pedro Antonio Nortes y Hortensia Calderón que me recibieron cuando llegué y Manolo García, Pablo Puerto, Jose M^a de la Rosa y Marisa Corbalán que han estado a mi lado durante los últimos momentos de la realización de este trabajo.

A mis compañeros del área de Economía Agraria, por lo bien que me recibieron y por haberse interesado por el curso de la presente Tesis Doctoral, especialmente a los Dres. Narciso Arcas y M^a Dolores de Miguel.

A las Dras. Encarna Conesa y Josefina Contreras, profesoras del departamento de Producción Vegetal, en quien he encontrado apoyo y

compresión en muchas ocasiones. Gracias por haber dejado vuestra puerta abierta.

A mis suegros, Domingo Gómez Gómez y Victorina Gómez Castaño, que se han encargado de mis hijos en tantas ocasiones para que yo trabajase en esta Tesis y que tanto se preocupan por mí. Gracias por vuestra plena disposición.

A mis hermanos Antonio, Víctor y Guillermo y mis cuñadas, especialmente a Inma, que han estado pendientes de la realización de esta Tesis y que tanto me han ayudado con sus conversaciones.

A Raquel, mi hermanica, que se alegra con mis conquistas y sufre con mis derrotas. Por lo generosa que es conmigo, pudiendo hacer malabarismos con su tiempo para echarme una mano.

A Jesús Ros Villena, que estuvo siempre muy pendiente del transcurso de esta Tesis y tanto deseaba que llegase este momento para poder celebrarlo.

A mi amiga Rosa Zamora y mis primas Salomé e Inés en quienes he encontrado apoyo y comprensión en mis momentos de desánimo. Gracias por vuestros acertados consejos.

A mis tíos y primos, los de sangre y los políticos, en quien encuentro cariño y apoyo.

A mi padre, Manuel Pagán Martínez, cuyo recuerdo me inspira sentimientos de superación. Por la persona impecable que fue.

A mi madre, Elisa Rubio Gálvez, que ahora sé con certeza, que si pudiera, pasaría por mí todos los malos momentos y las noches sin dormir. Porque es un ejemplo de lucha y superación, que jamás se da por vencida y que me hizo ver que podía hacerlo.

A mi marido, Basilio Gómez Gómez, mi compañero, que siempre me apoya en todas mis empresas, por muy disparatadas que parezcan. Gracias por haberme facilitado el trabajo y no haberme reprochado el tiempo dedicado a esta Memoria en detrimento de nuestra familia. Gracias por tu comprensión y tu apoyo constante.

*A mis hijos, Elisa y Darío,
que me inspiran el deseo de un
mundo mejor y son el motor que
mueve mi vida.*

RESUMEN

El objetivo general de este trabajo de tesis fue optimizar el manejo del riego en mandarino y almendro, dos cultivos leñosos relevantes en la Región de Murcia, a partir de indicadores del estado hídrico de la planta.

Para este fin se desarrollaron dos ensayos, uno durante tres años en una explotación comercial de mandarinos cv. Fortune regados con una mezcla de agua procedente del trasvase Tajo-Segura y de pozo, cuya conductividad eléctrica ($CE_{25^{\circ}C}$) varió en función de la disponibilidad de agua del trasvase, alcanzándose valores constantes ligeramente por encima de 4 dS m^{-1} durante el segundo y tercer año. El otro, durante dos años, en almendros cv. Marta regados con agua del trasvase Tajo-Segura, sin problemas de salinidad.

En el ensayo del mandarino se compararon cuatro tratamientos de riego: i) Control (CTL), regado al 100% de la ET_c , aplicando unos requerimientos de lavado del 33% a partir del segundo año; ii) Riego deficitario controlado (RDC), regado como CTL excepto en la fase I y principio de la II del crecimiento del fruto donde se regó al 65 y al 50% de CTL en la primera (2005-06) y las dos últimas campañas (2006-08), respectivamente, y al 80% en la fase III; iii) RDC_{50} , regado al 50% de RDC durante el periodo de déficit de las campañas 2006-07 y 2007-08 y el resto del ciclo como CTL; iv) Riego programado por el agricultor (FINCA), al que se aplicaron reducciones en torno al 50% de CTL durante las fases I y II y por encima de CTL (170-200% CTL) desde finales de la fase II hasta el final de la campaña.

La aplicación del déficit hídrico durante la fase II del crecimiento del fruto se delimitó de forma precisa con la ayuda de los dendrómetros, de modo que la restitución del riego a niveles del control coincidiría con el inicio de la ralentización del crecimiento del tronco, prolongándose el déficit hídrico durante los meses de verano.

La salinidad del agua de riego en los dos últimos años no tuvo un efecto negativo en las producciones obtenidas en CTL ($59,5 \text{ kg árbol}^{-1}$), en cambio, sí redujo su crecimiento vegetativo. La producción de los tratamientos RDC_{50} y FINCA se redujo en el segundo y tercer año de experimentación. RDC mantuvo niveles de producción similares a los de CTL en los dos primeros años, con ahorros de agua del 8 y 36%, sin embargo, el tercer año, se obtuvo el 37% de la producción de CTL, debido a la disminución del número de frutos por árbol, mostrándose la interacción negativa del riego deficitario controlado y la salinidad.

En el ensayo del almendro se compararon cuatro tratamientos de riego: i) Control (CTL), regado al 110% ET_c al objeto de evitar condiciones limitantes de agua en el

suelo; ii) Riego deficitario controlado tradicional (RDC_t), regado al 100% ET_c excepto durante la fase IV (\approx junio-mediados de agosto) cuando se aportó el 30% ET_c ; iii) Riego deficitario continuo (RD_d) basado en mantener la intensidad de señal de la máxima contracción diaria del tronco (MCD , $IS = MCD_{RD_d}/MCD_{CTL}$) en torno a 1,1 durante toda la estación de riego; iv) Riego deficitario controlado (RDC_d), basado en mantener IS (MCD_{RDC_d}/MCD_{CTL}) entre 1 y 1,1, excepto en la fase IV, que fue de 1,4.

El principal resultado obtenido en este ensayo fue la posibilidad de programar el riego en almendro en base a IS procedente de la MCD . La programación realizada cada 3 días consiguió ajustar mejor IS al valor deseado, con variaciones en los volúmenes de agua inferiores a los realizados cuando el programa se ajustó semanalmente. Por otro lado, se ha visto la necesidad de prestar especial atención al cambiar el valor umbral de IS tal y como se observa en RDC_d , sobre todo durante la fase V, donde una vez restituido el riego, la respuesta adaptativa del cultivo al estrés hídrico propició valores de crecimiento muy superiores al control. La programación del riego deficitario controlado basado en la dendrometría (RDC_d) resultó ventajosa sobre la tradicional (RDC_t) al conseguir un control más idóneo del estado hídrico de la planta que penalice en menor medida el crecimiento vegetativo, y por consiguiente una repercusión menos negativa en las cosechas siguientes.

Entre los indicadores del estado hídrico de la planta estudiados en ambos cultivos (Ψ_t , TCD , MCD), la máxima contracción diaria del diámetro de tronco (MCD) resultó el más idóneo en el establecimiento de líneas de referencia para la programación del riego debido a su respuesta lineal y buena correlación con la temperatura (mandarino, $r^2 > 0,7^{***}$) y el déficit de presión de vapor (almendro, $r^2 > 0,8^{***}$). En el mandarino, la comparación de las correlaciones de los dos años de estudio (2005 y 2006) no mostró diferencias entre ellas a pesar del incremento de salinidad y la disminución en la carga productiva que se produjo en el segundo año, además, se observó un mejor valor predictivo de las líneas obtenidas con valores del periodo comprendido entre marzo y octubre (Fases I y II del crecimiento del tronco), que coinciden con el periodo de máximos requerimientos hídricos del cultivo. Del mismo modo, el estudio por fases fenológicas en almendro mostró diferencias significativas entre las líneas de referencia de los dos años de estudio (2006 y 2007) en el periodo correspondiente a las fases II-III, pero no entre este periodo y las siguientes fases. Por lo que la línea de referencia obtenida en este periodo podría ser utilizada para la programación del riego en el resto del ciclo.

ABSTRACT

The overall aim of this Doctoral Thesis was to optimize irrigation management in mandarin and almond trees, two relevant fruit trees in the Region of Murcia, according to plant-based water indicators.

Two tests were developed for this purpose: i) another one for three years in a commercial orchard of mandarin cv. 'Fortune' and ii) other one, for two years in almond cv. 'Marta'. The mandarin trees were watered with a mixture of water from the Tajo-Segura transfer and from well, whose electrical conductivity ($EC_{25^{\circ}C}$) varied depending on the availability of water transfer, reaching constant values slightly higher than 4 dS m^{-1} during the second and third year of testing. Meanwhile the almond trees were irrigated with water from the Tajo-Segura transfer, without salinity problems.

In the mandarin experiment four irrigation treatments were compared: i) Control (CTL), irrigated at 100% ET_c , applying a leaching requirements of 33% from the second year. ii) Regulated deficit irrigation (RDI), watered as CTL except for phase I and beginning of the phase II of the fruit growth where it was irrigated at 65 and 50% of CTL in the first (2005-06) and the last two seasons (2006-08) respectively, and 80% in phase III. iii) RDI_{50} , watered to 50% of RDI during the deficit period in 2006-07 and 2007-08 seasons and the rest of season like CTL. iv) FARM, scheduled by the farmer, who applied by about 50% of CTL during phases I and II and watered over CTL (170-200% CTL) from the end of phase II until the end of the irrigation season.

The length of the less sensitive period to the water deficit in the phase II of the fruit growth was delimited by LVDT sensors in a precise way. So that the restitution of the irrigation at control levels coincided with the start of slowing trunk growth, extending the water deficit during the summer months.

The salinity of the irrigation water over the last two years did not have a negative effect on the yields obtained in CTL ($59.5 \text{ kg tree}^{-1}$), however, it reduced its vegetative growth. RDI_{50} and FARM yields decreased in the second and third year of study. RDI maintained similar yield levels than CTL in the two first harvests, with water savings of 8 and 36%. However, in the third year, the obtained yield was 37% of CTL, due to the decreasing in crop load, showing a negative interaction between deficit irrigation and salinity.

In the almond experiment four irrigation treatments were compared: i) Control (CTL), irrigated at 110% ET_c in order to avoid limiting conditions of soil water; ii) traditional regulated deficit irrigation (RDI_t), irrigated at 100% ET_c , except during

phase IV (\approx June-mid August) when trees received 30% ETC; iii) continuous deficit irrigation based on MDS (RDC_d), irrigated to maintain the signal intensity ($SI = MDS_{RDC_d} / MDS_{CTL}$) around 1.1 throughout the irrigation season and iv) deficit irrigation based on MDS (RDC_d), irrigated to maintain SI (MDS_{RDC_d} / MDS_{CTL}) between 1 and 1.1, except for phase IV, which was 1.4.

The main result in this assay was the ability to schedule irrigation in almond based on SI. When scheduling took place every 3 days it got better adjusted to the desired SI, with minor variations in the water supplied, than the results obtained when the program was adjusted once a week. On the other hand, it has been seen the need to pay special attention when changing the threshold value of SI as observed in RDC_d , specially during phase V, where once irrigation was restored, the adaptive response of the crop to water stress led to values of growth much higher than those reached in control. The regulated deficit irrigation scheduling based on LVDT sensors (RDC_d) proved advantages over the traditional (RDC_t) to get better plant water status which led to increased vegetative growth. So it had a less negative impact in the next year's harvest.

Above all indicators of plant water status studied in both crops (Ψ_{stem} , TGR, MDS), the maximum daily shrinkage of stem diameter (MDS) was the most suitable in establishing baselines for irrigation scheduling because of its linear response and good correlation with temperature (mandarin, $r^2 > 0.7^{***}$) and vapor pressure deficit (almond, $r^2 > 0.8^{***}$). In mandarin, the comparison of the correlations of the two-years study (2005 and 2006) showed no difference between them, in spite of the fact that, salinity was increased and crop load was decreased during the second year. In addition to this, it was recorded the highest predictive value of baseline values obtained from March to October (phases I and II of trunk growth), period of maximum crop water requirements. In the same way, the study in almond by phenological phases showed significant differences between the baselines of the two-year study (2006 and 2007) in the period corresponding to phases II-III, but not between this period and the following phases. So, the obtained baseline in this period could be used for irrigation scheduling during the rest of the season.

ÍNDICE

Índice de figuras	i
Índice de tablas.....	vii
Lista de símbolos y acrónimos.....	xi

CAPÍTULO 1. Antecedentes

1.1. Situación de la agricultura de regadío	3
1.2. Programación y manejo de riego en frutales. Uso de indicadores del estado hídrico de la planta	4
1.2.1. Medidas discontinuas en planta	5
1.2.1.1. Potencial hídrico foliar	5
1.2.1.2. Conductancia estomática	9
1.2.1.3. Crecimiento vegetativo	10
1.2.2. Medidas continuas en planta	10
1.2.2.1. Temperatura del dosel vegetal	10
1.2.2.2. Flujo de savia	11
1.2.2.3. Fluctuación del diámetro del tronco y del fruto	13
1.3.- Riego Deficitario Controlado (RDC)	15
1.4. Programación del riego a partir de sensores en planta	18
1.4.1. Sensibilidad de los parámetros derivados de la fluctuación del diámetro del tronco	18
1.4.2.- Líneas de referencia	19
1.4.3.- Ejemplos de programación del riego a partir de MCD	21

CAPÍTULO 2.- Justificación y objetivos

2.1. Justificación	25
--------------------	----

CAPÍTULO 3.- Métodos y equipos de medida

3.1. Introducción	29
3.2. Clima	29
3.2.1. Déficit de presión de vapor	30
3.2.2. Integral térmica	31
3.3. Suelo	32

3.3.1. Estado hídrico	32
3.3.2. Salinidad	32
3.4. Planta	33
3.4.1. Estado hídrico	33
3.4.1.1. Potencial hídrico foliar a mediodía y sus componentes	34
3.4.1.2. Potencial hídrico de tallo a mediodía	34
3.4.1.3. Fluctuación del diámetro del tronco	35
3.4.1.4. Parámetros de intercambio gaseoso	35
3.4.2. Estado nutricional del cultivo	36
3.4.3. Crecimiento vegetativo	37
3.4.3.1. Sección transversal del tronco	37
3.4.3.2. Poda	37
3.4.4. Floración	37
3.4.5. Crecimiento del fruto	38
3.4.6. Producción	39
3.4.7. Análisis de la calidad de la cosecha de mandarina	39
3.4.7.1. Parámetros físicos	39
3.4.7.2. Parámetros químicos	43
3.4.8. Análisis de la calidad física de la almendra	44
3.4.9. Conservación de frutos de mandarino	45

CAPÍTULO 4.- Respuesta agronómica y fisiológica del mandarino sometido a riego deficitario controlado con agua salina

4.1. Introducción	49
4.2. Material y métodos	50
4.3. Resultados y discusión	54
4.3.1. Agua aplicada	54
4.3.2. Estado hídrico del suelo	55
4.3.3. Estado hídrico de la planta	59
4.3.4. Estado nutricional del cultivo	71
4.3.5. Crecimiento vegetativo	73

4.3.6. Crecimiento del fruto	76
4.3.7. Producción y calidad	79
4.4. Conclusiones	89

CAPÍTULO 5.- Líneas de referencia basadas en la máxima contracción diaria del diámetro del tronco

5.1. Introducción	93
5.2. Material y Métodos	94
5.2.1. Ensayo en mandarino	94
5.2.2. Ensayo en almendro	95
5.2.3. Análisis estadístico	97
5.3. Resultados	97
5.3.1. Ensayo en mandarino	97
5.3.2. Ensayo en almendro	105
5.4. Discusión	112
5.5. Conclusiones	118

CAPÍTULO 6.- Programación de riego en base a la intensidad de señal de la máxima contracción diaria de diámetro de tronco

6.1. Introducción	123
6.2. Material y Métodos	123
6.3. Resultados y discusión	125
6.4. Conclusiones	142

CAPÍTULO 7.- Conclusiones generales

145

Bibliografía

149

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1.** Evolución del potencial hídrico foliar en cítricos después de un riego (Post y Sakovich, 1986). 8
- Figura 1.2.** Evolución de la diferencia de temperaturas a mediodía entre las hojas y el aire ($T_f - T_a$) de nectarinos bien regados (círculos azules) y con estrés hídrico (círculos rojos). Los valores corresponden a la media de 3 repeticiones \pm ES (Pérez-Pastor, comunicación personal). 11
- Figura 1.3.** Evolución del flujo de savia en albaricoqueros jóvenes cultivados en maceta bajo invernadero. Las líneas discontinuas indican el momento de supresión (1) y reanudación del riego (2) (Domingo *et al.*, 1999). 12
- Figura 1.4.** Parámetros derivados de las fluctuaciones del diámetro de tronco (FDT) durante 2 días consecutivos (Goldhamer y Fereres, 2001). 14
- Figura 4.1.** Potencial matricial del agua en el suelo (Ψ_m) a 30 (arriba) y 70 cm (abajo) de profundidad de los tratamientos CTL (—●—) y RDC (—○—) durante la campaña 2005-06. La barra superior indica los aportes de riego (%) al tratamiento deficitario respecto a CTL. 56
- Figura 4.2.** Contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v), en los perfiles 0-60 (arriba) y 60-90 (abajo) de los tratamientos CTL (—●—) y RDC (—○—) durante las tres campañas ensayadas. La barra superior indica los aportes de riego al tratamiento deficitario (%) respecto a CTL. *DDPF*: Días desde plena floración. 57
- Figura 4.3.** Valores de la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (CEe, dS m^{-1}) procedentes de muestras tomadas en la zona del bulbo húmedo el 3 de febrero (tras regar con agua salina, ■) y el 20 de febrero de 2006 (tras regar con agua de buena calidad, □). Las letras indican diferencias entre tratamientos para la misma posición de muestreo y para el mismo día, y la ausencia de letras muestra ausencia de diferencias. 58
- Figura 4.4.** Evolución de la *ETo* Penman-Monteith y precipitación durante las tres campañas que duró el experimento (a, b, c); evolución estacional del potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) de los tratamientos de riego (CTL—●—; RDC—○—; RDC₅₀—●—; FINCA —●—). Cada punto corresponde a la media de 4 repeticiones (d, e, f). Los asteriscos indican diferencias de los tratamientos RDC (*), RDC₅₀ (*) y FINCA (*) respecto a CTL según test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$). Las líneas verticales marcan la separación entre fases fenológicas según el crecimiento del fruto. 60
- Figura 4.5.** Evolución estacional del potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) de los diferentes tratamientos de riego (CTL—●—; RDC—○—; RDC₅₀—●—; FINCA —●—) y la temperatura mínima (—◆—). Cada punto corresponde a la media de 4 62

repeticiones.

Figura 4.6. Evolución del potencial hídrico foliar (Ψ) y sus componentes, potencial osmótico (Ψ_o) potencial de presión (Ψ_p) y potencial osmótico saturado (Ψ_o^{100}) de los diferentes tratamientos de riego (CTL ■; RDC ■; RDC₅₀ ■; FINCA ■) durante la campaña 2006-07. Cada punto corresponde a la media de 4 repeticiones. Las letras indican diferencias entre tratamientos según el test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$). Las barras superiores indican los aportes de agua en relación al control en cada uno de los tratamientos estudiados.

64

Figura 4.7. Evolución de la tasa de crecimiento (TCD) y de la máxima contracción diaria del diámetro del tronco (MCD) en los diferentes tratamientos de riego (CTL—●—; RDC—○—; FINCA —●—) durante las campañas 2005-06 y 2006-07. Cada punto representa la media de los valores semanales. Los asteriscos indican diferencias de los tratamientos RDC (*) y FINCA (*) con CTL según test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$). Las líneas verticales indican la separación entre fases fenológicas según el crecimiento del fruto. Las barras superiores indican los aportes de agua en relación al control en cada uno de los tratamientos estudiados.

66

Figura 4.8. Detalle de la fluctuación del diámetro del tronco (FDT) en los cuatro tratamientos de riego en la campaña 2007-08 en el periodo: 2 agosto – 6 septiembre. Cada línea refleja la media de ocho dendrómetros. Las barras verticales muestran valores medios de potencial de tallo (Ψ_t). Cada barra representa la media de ocho medidas.

67

Figura 4.9. Relación entre el potencial hídrico de tallo (Ψ_t) y la máxima contracción diaria del diámetro del tronco (MCD) en los tratamientos CTL (●) y RDC (○) en las fases I y II de las campañas 2005-06 y 2006-07.

68

Figura 4.10. Evolución de la fotosíntesis neta (P_n) y la conductancia estomática (g_s) de los diferentes tratamientos de riego (CTL—●—; RDC—○—; RDC₅₀—●—; FINCA —●—) y la temperatura máxima en los días de medida (—★—) durante la campaña 2006-07. Cada punto corresponde a la media de 4 repeticiones. Los asteriscos indican diferencias de los tratamientos RDC (*) RDC₅₀ (*) y FINCA (*) respecto a CTL según test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$). Las barras superiores indican los aportes de agua en relación a CTL en cada uno de los tratamientos estudiados.

70

Figura 4.11. Relación entre la conductancia estomática (g_s) y la fotosíntesis neta (P_n) en los diferentes tratamientos de riego: CTL (●); RDC (○); RDC₅₀ (Δ); FINCA (▽) para las tres fases de crecimiento del tronco de las campañas 2006-07 y 2007-08.

71

Figura 4.12. Evolución de los valores máximos de diámetro de tronco obtenidos por los dendrómetros (MXTD) para los tratamientos: CTL (■), RDC (■) y FINCA (■) durante las campañas 2005-06 y 2006-07. Las líneas verticales

indican la separación entre fases fenológicas según el crecimiento del fruto. Las barras superiores indican los aportes de agua en relación al control en cada uno de los tratamientos estudiados.

74

Figura 4.13. Correlación en los diferentes tratamientos de riego, CTL (●); RDC (○); RDC₅₀ (Δ); FINCA (▽), entre la variación de la sección transversal del tronco (ΔSTT) y el volumen de agua aplicada (VAA) (a). Correlación entre la ΔSTT y la integral de estrés ($S\Psi$) (b). Cada punto representa la media de cuatro repeticiones. * indica significación a $P < 0,05$.

75

Figura 4.14. Madera eliminada por la poda en los tres años de ensayo (CTL ■; RDC ■; RDC₅₀ ■; FINCA ■). Cada barra representa la media de 20 árboles. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$).

76

Figura 4.15. Velocidad de crecimiento relativa del fruto (VCR) para los tratamientos ensayados (CTL —; RDC —; RDC₅₀ —; FINCA —) en los tres años de estudio (a, b, c), y evolución del crecimiento del fruto (CTL—●; RDC—○; RDC₅₀—●; FINCA—●) (d, e, f). Los asteriscos indican diferencias de RDC (*) RDC₅₀ (*) y FINCA (*) respecto a CTL según test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$). Las barras verticales marcan las diferentes fases del crecimiento del fruto. Las barras superiores muestran los aportes hídricos para los tratamientos deficitarios en relación a CTL.

77

Figura 4.16. Crecimiento de fruto (—) y tronco (—) de CTL (a). Correlación entre el diámetro ecuatorial del fruto (Φ) y el valor máximo de diámetro de tronco (MXTD) el día de medida en CTL (b). Valores correspondientes a la campaña 2005-06.

78

Figura 4.17. Variación del índice de producción (relativo al control) en las cosechas evaluadas.

80

Figura 4.18. Correlación entre el índice de producción (P_x/P_{CTL}) y el volumen de riego relativo (VAA_x/VAA_{CTL}). Cada punto corresponde a la media de cuatro repeticiones. * indica significación a $P < 0,05$. RDC (○); RDC₅₀ (Δ); FINCA (▽).

83

Figura 4.19. Pérdida de peso de mandarinas Fortune durante los 50 días de conservación a 5 °C y el periodo de comercialización de 8 días a 20 °C en los cuatro tratamientos de riego (CTL—●; RDC—○; RDC₅₀—●; FINCA—●). Cada punto corresponde a la media de 12 frutos. Las barras en los puntos de datos indican el error estándar. Los asteriscos indican diferencias con CTL según Test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$).

88

Figura 5.1. a. Evolución anual de la temperatura media diaria (.....), evapotranspiración de referencia diaria, ETo (—) y déficit de presión de vapor medio diario, DPV_m (—); b. Volumen de agua de riego aplicado (—) y conductividad eléctrica (CE) del agua (■); c. Potencial matricial del agua en

el suelo a 30 cm de profundidad (Ψ_m) (●) y precipitación (■), durante las campañas 2005-06 (1) y 2006-07 (2). Cada punto es la media de cuatro medidas. Las barras inferiores delimitan los años y los meses durante el periodo experimental.

98

Figura 5.2. Evolución del diámetro máximo del tronco (—) y del diámetro del fruto (●). Cada punto es la media de 8 y 100 medidas para tronco y fruto, respectivamente. Las líneas verticales marcan las distintas fases fenológicas del crecimiento del fruto (— ·) y del tronco (— ·) (a). Evolución anual de la tasa de crecimiento diaria del tronco (TCD) (b) y de la máxima contracción diaria del tronco (MCD) a nivel semanal (c). Potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) (d). Cada punto es la media de 8 medidas y los números (1) y (2) hacen referencia a las campañas 2005-06 y 2006-07, respectivamente. Las barras inferiores delimitan los años y los meses del periodo experimental.

100

Figura 5.3. Relaciones entre MCD y ETo durante el periodo marzo-octubre (fases I y II) de 2005 (a) y 2006 (b). Cada punto es la media de 8 medidas. *** $P < 0,001$.

103

Figura 5.4. Relaciones entre MCD y Rs durante el periodo marzo-octubre (fases I y II) de 2005 (a) y 2006 (b). Cada punto es la media de 8 medidas. *** $P < 0,001$.

103

Figura 5.5. Relaciones entre MCD y DPV_m (●), DPV_{mx} (○) y DPV_{md} (●) durante el periodo marzo-octubre (fases I y II) de 2005 (a) y 2006 (b). Cada punto es la media de 8 medidas. *** $P < 0,001$.

104

Figura 5.6. Relaciones entre MCD y T_m (●), T_{mx} (○) y T_{md} (●) durante el periodo marzo-octubre (fases I y II) de 2005 (a) y 2006 (b). Cada punto es la media de 8 medidas. * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$.

104

Figura 5.7. Relaciones entre la máxima contracción diaria (MCD) y el potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t). Las líneas de regresión engloban los datos de las dos campañas de estudio. Cada punto es la media de 8 medidas. *** $P < 0,001$.

105

Figura 5.8. Evolución estacional de la temperatura (T_m ; ●), y déficit de presión de vapor (DPV_m ; ○) medios diarios (a); lluvia y contenido relativo de agua extraíble (CRAE) (b); potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) (c); máxima contracción diaria de tronco (MCD) (d); tasa de crecimiento diario de tronco (TCD) (e) durante 2006 (1) y 2007 (2). Las líneas verticales en c-e delimitan las fases fenológicas.

107

Figura 5.9. Relación entre la máxima contracción diaria del diámetro del tronco (MCD) y el déficit de presión de vapor, promedio del periodo de las 10:00-15:00 (DPV_{md}), para las fases fenológicas II-III (a), IV (b), V (c) y todo el periodo (d). Las líneas muestran las regresiones lineales para todos los puntos de 2006 y 2007. Cada punto es la media de 6 medidas. *** $P < 0,001$.

110

Figura 5.10. Relación entre la máxima contracción diaria del diámetro del tronco (MCD) y potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) para las fases II-III (a), fase IV (b), poscosecha (c) y toda la estación (d). Las líneas de regresión engloban los datos del periodo 2006 - 2007. Las ordenadas en el origen seguidos por diferentes letras indican diferencias significativas entre ellos ($P < 0,05$). Pendientes seguidas de diferentes letras indican diferencias significativas entre ellas ($P < 0,05$). Cada punto es la media de 6 medidas. *** $P < 0,001$.

111

Figura 5.11. Relación entre el potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) y el déficit de presión de vapor medio diario (DPV_m). Las medidas corresponden a 2006 (círculos) y 2007 (triángulos). Cada punto es la media de 6 medidas. Las líneas continua y discontinua punteada corresponden a las regresiones lineales del periodo precosecha (símbolos blancos) y poscosecha (símbolos negros), respectivamente. ** $P < 0,01$, *** $P < 0,001$.

112

Figura 6.1. Evolución del déficit de presión de vapor máximo (DPV_{mx} ; —), temperatura máxima (T_{mx} ; ●) y precipitación (■) durante 2006 (A) y 2007 (B). Valores medios de intensidad de señal (MCD_{RDd}/MCD_{CTL} o MCD_{RDCd}/MCD_{CTL}) (●) y variación en porcentaje de las dosis de riego respecto a la programación anterior (■) en RD_d (figuras C y D, 2006 y 2007, respectivamente), y en RDC_d (figuras E y F, 2006 y 2007, respectivamente). Volumen de riego acumulado en los tratamientos RD_d (—), RDC_d (—) y CTL (—). Las líneas de trazo discontinuo delimitan las fases fenológicas del ciclo del almendro. Cada punto de intensidad de señal corresponde a la media de 5 medidas.

127

Figura 6.2. Evolución de la máxima contracción diaria del diámetro de tronco, media semanal, (MCD), de la conductancia estomática (g_s) y potencial de tallo a mediodía (Ψ_t) durante 2006 y 2007 (A, C, E y B, D, F, respectivamente) para los tratamientos CTL ●; RDC_t ○; RD_d ● y RDC_d ●. Cada punto corresponde a la media de 5 (MCD) y 6 (Ψ_t y g_s) medidas \pm ES. Los asteriscos indican diferencias significativas entre los tratamientos deficitarios RDC_t (*), RD_d (*) y RDC_d (*) y CTL según el test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$). Las líneas verticales indican la separación entre fases fenológicas.

130

Figura 6.3. Evolución anual de la tasa de crecimiento diaria de tronco (TCD) durante 2006 (A) y 2007 (B) para los tratamientos de riego: CTL ●; RDC_t ○; RD_d ●; RDC_d ●. Cada punto representa la media semanal de TCD obtenida a partir de 5 medidas de diámetro de tronco \pm ES. Los asteriscos indican diferencias de RDC_t (*), RD_d (*) y RDC_d (*) respecto a CTL según el test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$). Las líneas verticales indican la separación entre fases fenológicas.

134

Figura 6.4. Relación entre el peso seco de las ramas de poda (izquierda) e incremento de la sección transversal del tronco (ΔSTT) (derecha) con la integral de estrés (S_{\square}) en los tratamientos deficitarios (RDC_t ○; RD_d Δ;

136

$\text{RDC}_d \nabla$).

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Características de los sensores utilizados en las estaciones climáticas, ‘La Palma’ (CA12) y ‘La Aljorra’ (CA52).	30
Tabla 4.1. Fechas de máxima floración y de la recolección durante el período experimental.	53
Tabla 4.2. Climatología, riego en CTL y porcentaje de ahorro de agua en los tratamientos deficitarios.	55
Tabla 4.3. Valores medios de conductividad eléctrica del agua de riego y de la solución del suelo (CEss) a 30 cm de profundidad correspondientes a la campaña 2007-08 por fases de crecimiento del fruto.	59
Tabla 4.4. Integral de estrés hídrico (S_{Ψ}) para los diferentes tratamientos de riego. S_{Ψ} ha sido determinada a partir de las medidas de Ψ_e .	62
Tabla 4.5. Análisis foliar realizado sobre muestras tomadas en noviembre.	72
Tabla 4.6. Sección transversal del tronco (STT) y variación de la sección transversal del tronco (ΔSTT) en mandarino cv. Fortune en los diferentes tratamientos de riego, durante los años de estudio.	73
Tabla 4.7. Influencia de los tratamientos de riego en la producción, n° frutos árbol ⁻¹ y peso medio del fruto en mandarino cv. Fortune.	81
Tabla 4.8. Influencia de los tratamientos de riego en la eficiencia en el uso del agua (EUA) y la distribución de recursos fotosintéticos (ratio producción ΔSTT^{-1} , ratio producción STT^{-1}) durante el periodo experimental.	82
Tabla 4.9. Influencia de los tratamientos de riego en las características externas de calidad, diámetro ecuatorial, espesor de corteza e índice de color externo (I_c) en mandarina cv. Fortune.	84
Tabla 4.10. Influencia de los tratamientos de riego en la composición del fruto.	85
Tabla 4.11. Influencia de los tratamientos de riego en los parámetros internos de calidad (AT: acidez titulable; SST: sólidos soluble totales).	86
Tabla 4.12. Parámetros de calidad del zumo (AT: acidez titulable (g ácido cítrico l ⁻¹); SST: sólidos soluble totales (°Brix); IM: índice de madurez) de mandarina Fortune en la cosecha y al final de la conservación (50 días a 5°C + 8 días a 20°C) en los diferentes tratamientos de riego.	87

Tabla 5.1. Valores medios de la sección transversal del tronco (STT), producción, nivel y carga de cosecha durante 2005-06 y 2006-07.	101
Tabla 5.2. Ecuaciones de regresión anuales derivadas de los mejores ajustes entre potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) y máxima contracción diaria del diámetro de tronco (MCD) con diferentes variables meteorológicas.	102
Tabla 5.3. Valores medios de la sección transversal del tronco (STT), producción, nivel y carga de cosecha durante 2006 y 2007.	106
Tabla 5.4. Parámetros de las ecuaciones de primer orden ($y = ax + b$) para la máxima contracción diaria del tronco (MCD) y la tasa de crecimiento diaria del tronco (TCD) y las variables climáticas seleccionadas. Periodo 2006 – 2007.	108
Tabla 5.5. Pendiente, coeficiente de determinación (r^2) y número de datos (n) de las regresiones lineales ($y = ax$) entre la máxima contracción diaria de diámetro de tronco (MCD) y el déficit de presión de vapor, promediado para el periodo 10:00-15:00 hora solar (DPV_{md}), para las diferentes fases fenológicas, en 2006 y 2007.	109
Tabla 6.1. Evapotranspiración de referencia (ET_o , mm), lluvia (mm) y agua aplicada (mm) al tratamiento control (CTL). Porcentaje de ahorro de agua respecto a CTL en los distintos tratamientos de riego durante el período experimental.	126
Tabla 6.2. Integral de estrés hídrico (S_Ψ) para los tratamientos deficitarios. S_Ψ se determinó a partir de las medidas de potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t).	131
Tabla 6.3. Valores medios del incremento de la sección transversal del tronco (ΔSTT) y peso seco de poda para los distintos tratamientos de riego en ambas campañas de ensayo.	135
Tabla 6.4. Influencia de los tratamientos de riego en la producción y componentes de la cosecha de almendro cv. Marta. Período 2006-2007.	139
Tabla 6.5. Influencia de los tratamientos de riego en los índices de eficiencia productiva y de uso del agua de riego en almendro cv. Marta durante el período experimental.	139
Tabla 6.6. Influencia de los tratamientos de riego sobre los determinantes de producción: almendras pelonas, dobles y vacías para cada año de estudio.	140
Tabla 6.7. Influencia de los tratamientos de riego sobre las dimensiones de la almendra-cáscara e índices de forma durante el período de ensayo.	141

Tabla 6.8. Influencia de los tratamientos de riego sobre las dimensiones de la almendra-grano e índices de forma durante el ensayo.

141

LISTA DE SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS

Símbolos latinos	Descripción	Unidades
AT	Acidez titulable	g l ⁻¹
CE _{25°C}	Conductividad eléctrica del agua de riego	dS m ⁻¹
CEe	Conductividad eléctrica del extracto saturado	dS m ⁻¹
CEss	Conductividad eléctrica de la solución del suelo	dS m ⁻¹
D	Diámetro	mm
e_a	Presión de vapor actual	kPa
e_s	Presión de vapor a saturación a la temperatura del aire	kPa
EUA	Eficiencia en el uso del agua	kg m ⁻³
ET _o	Evapotranspiración de referencia (Allen <i>et al.</i> , 1998)	mm día ⁻¹
ET _c	Evapotranspiración máxima del cultivo	mm día ⁻¹
g _s	Conductancia estomática	mmol m ⁻² s ⁻¹
HR	Humedad relativa	%
I ₁	Índice de forma	--
I ₂	Índice de forma	--
I _c	Índice de color para los cítricos	--
IM	Índice de madurez	--
IS	Intensidad de señal. Responde al cociente: $MCD_{\text{tratamiento}}/MCD_{CTL}$	—
IS _p	Valor de IS prefijado. Este es el valor en que se quiere mantener IS de un tratamiento determinado.	—
IT	Integral térmica	GDH °C
GDH	Growing degree hour (1 grado hora de crecimiento)	
Kc	Coeficiente de cultivo	--
Kr	Factor de corrección en función del área sombreada por el cultivo	--
L	Longitud	mm
‘m’	Subíndice: indica media diaria	--
‘md’	Subíndice: indica promedio de la variable considerada entre las 10 y 15 h solar.	--
‘mx’	Subíndice: indica valor máximo diario	--

Símbolos latinos	Descripción	Unidades
P	Presión	MPa
P	Precipitación	mm
P_n	Fotosíntesis neta	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
P_f	Peso fresco	kg
P_s	Peso seco	kg
RL	Requerimientos de lavado	--
R_s	Radiación solar global	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$
SST	Sólidos solubles totales	°Brix
STT	Sección transversal del tronco	cm^2
ΔSTT	Variación de la STT	cm^2
T	Temperatura	° C
T	Diámetro transversal	mm
t	tiempo	
T_b	Temperatura base	° C
T_o	Temperatura óptima	° C
T_c	Temperatura crítica	° C
VAA	Volumen de agua aplicada	mm
VCR	Tasa de crecimiento relativo	$\text{mm mm}^{-1} \text{día}^{-1}$
V_v	Velocidad de viento	m s^{-1}

Símbolos griegos	Descripción	Unidades
θ	Esfericidad	--
θ_v	Contenido volumétrico de agua en el suelo	%
Φ	Diámetro del fruto	mm
S_Ψ	Integral de estrés hídrico	MPa día
Ψ	Potencial hídrico foliar	MPa
Ψ_a	Potencial hídrico foliar antes del alba	MPa
Ψ_m	Potencial matricial del agua en el suelo	cbar

Símbolos griegos	Descripción	Unidades
Ψ_{md}	Potencial hídrico foliar a mediodía	MPa
Ψ_o	Potencial osmótico	MPa
Ψ_o^{100}	Potencial osmótico saturado	MPa
Ψ_p	Potencial de presión	MPa
Ψ_t	Potencial hídrico de tallo a mediodía	MPa

Acrónimos	Descripción	Unidades
AEMA	Agencia Europea de Medio Ambiente	
CE	Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹
CHS	Confederación Hidrográfica del Segura	--
CTL	Tratamiento control	--
CRAE	Contenido relativo de agua extraíble	--
D	Diámetro	cm
DAM	Desviación absoluta media	--
DDPF	Días desde plena floración	--
DPV	Demanda evaporativa de la atmósfera	kPa
EEA	European Environment Agency	--
ESEA	Estación Experimental Agroalimentaria	--
FDT	Fluctuación del diámetro del tronco	
g _s	Conductancia estomática	mmol m ⁻² s ⁻¹
IEA	Índice de explotación de agua	%
LVDT	Linear variable diameter transducer	--
MAPA	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación	--
MCD	Máxima contracción diaria del tronco	μm
MNTD	Valor mínimo de diámetro diario de tronco	μm
MXTD	Valor máximo de diámetro diario de tronco	μm
PAR	Radiación fotosintética activa	μmol m ⁻² s ⁻¹
RD	Riego deficitario	

Acrónimos	Descripción	Unidades
RD _d	Riego deficitario continuo programado a partir de dendrometría	--
RDC	Riego deficitario controlado	--
RDC _d	Riego deficitario controlado programado a partir de la dendrometría	--
RDC _t	Riego deficitario controlado tradicional	--
RDC ₅₀	Riego deficitario controlado, regado al 50% del tratamiento RDC durante los periodos en que se aplicó déficit hídrico	--
TCD	Tasa de crecimiento diaria del tronco	μm día ⁻¹

1.- Antecedentes

1.1. Situación de la agricultura de regadío

El riego es una práctica fundamental para el suministro mundial de alimentos, y así lo atestigua el hecho de que con menos del 17% de la superficie cultivada se obtenga el 40% de éstos (Ferrerres y Evans, 2006). En España, más del 50% de la producción final agrícola procede del regadío, es decir, del 13% de la superficie agrícola útil (MAPA, 2001).

El incremento de productividad generado por el regadío está permitiendo que una población activa agraria cada vez menor, pueda alimentar a una población urbana cada vez mayor y más exigente en cuanto a variedad, cantidad y calidad de los alimentos demandados. Además, hay que tener en cuenta que la agricultura de regadío ha llevado consigo un desarrollo económico y social en aquellas zonas en las que se ha puesto en práctica. En España, y a pesar de los problemas estructurales, derivados en parte, de las pequeñas dimensiones de sus explotaciones (10,6 UDE¹ frente a 18,4 UDE de la media europea), muchos agricultores han podido incrementar y asegurar su renta agraria a través del regadío, diversificando las producciones y reduciendo el riesgo de sequía de los climas secos áridos y semiáridos, en los que la escasez y variabilidad de las precipitaciones provocan severas pérdidas económicas (MAPA, 2001).

A las importantes ventajas de la agricultura de regadío les acompaña el hecho de ser el principal consumidor de agua del planeta, ya que a ella se destina el 70% de los recursos disponibles e incluso el 95% en muchos países en desarrollo. Esta realidad limita su uso para el progreso de otros sectores de la sociedad (FAO, 2007a). La agencia europea de medio ambiente (AEMA) cifra el consumo de agua por la agricultura europea en tan sólo el 24%, aunque este porcentaje se incrementa según la zona considerada. Así en el sur de Europa se alcanza el 60%, y en algunos países como España hasta el 80%. España es uno de los nueve países europeos considerados hídricamente estresados (EEA, 2009a), con un índice de explotación de agua (IEA) de aproximadamente un 34%². Pero este valor no refleja ni la

¹ UDE: Unidad Dimensión Europea, equivalente a 1.200 euros de margen bruto estándar.

² IEA > 20%: situación de estrés en los recursos hídricos. IEA > 40%: estrés hídrico severo y un uso de los recursos hídricos claramente insostenible (Raskin *et al.*, 1997).

extensión ni la severidad de la escasez de agua en las regiones del sur, donde las cuencas de Andalucía y del Segura tienen valores de IEA extremadamente altos, 164% y 127%, respectivamente (EEA, 2009b). La cuenca del Segura presenta un déficit hídrico estructural cifrado en aproximadamente $460 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$ (CHS, 2007). Situación que comporta la necesidad de trasvasar agua procedente de otras Cuencas Hidrográficas, extraer agua de los acuíferos y desalar agua de mar y subterráneas salobres, actuaciones que elevan sobremanera el precio del agua para la agricultura. Así el coste del agua procedente del trasvase Tajo-Segura asciende a $0,1741 \text{ € m}^{-3}$ (BOE, 2009), mientras que el agua desalada puede llegar a $0,54 \text{ € m}^{-3}$ como es el caso de la desaladora Virgen del Milagro de Mazarrón.

En este contexto queda clara la necesidad de incrementar la productividad del agua a través de diversas actuaciones, tales como: i) el logro de altas eficiencias en el transporte, almacenamiento y distribución del agua, ii) la programación eficiente del riego a partir de métodos que minimicen las diferencias entre el agua aportada y el agua demandada por la planta y iii) el uso de estrategias de riego que permitan ahorros de agua manteniendo niveles de producción y calidad adecuados, como puede ser el riego deficitario controlado (RDC).

1.2. Programación y manejo de riego en frutales. Uso de indicadores del estado hídrico de la planta

La programación del riego fue definida por Trimmer y Hansen (1994) como el cálculo del aporte de agua que necesita la planta en cada momento. Se trata de responder a las preguntas de cuándo, intervalo entre riegos, y cuánto regar, volumen de riego. Una programación inadecuada del riego puede conducir a un déficit hídrico o a una pérdida de agua en profundidad, lo que disminuiría la eficiencia de aplicación del agua de riego. Jackson (1982) clasifica los métodos de programación del riego en tres tipos, basados en la medida i) de las variables climáticas del lugar, ii) del estado hídrico del suelo, y iii) del estado hídrico de la planta. Cada uno de estos métodos presentan numerosas ventajas e inconvenientes (Jones, 2004) si bien la planificación del riego con cualquiera de ellos requiere la definición previa de los valores a partir de los cuales iniciar y modular el riego, como son: un cierto nivel de

agotamiento del agua en el suelo, del estado energético del agua en el suelo y/o en la planta.

Desde antiguo se ha considerado que el método ideal para el control del riego era utilizar a la propia planta como detector de sus necesidades hídricas, al integrar ésta las condiciones de su entorno, clima y suelo (Domingo *et al.*, 2005). Sin embargo, no informa directamente acerca de la cantidad de agua que hay que aportar a la planta (Jones, 2004). Existen actualmente varios métodos de evaluación del estado hídrico de la planta, pero su uso, en la mayoría de los casos, está restringido a centros de investigación o a explotaciones de alto nivel técnico, con una adecuada formación de agricultores y técnicos. Para la evaluación del estado hídrico de la planta se utilizan diferentes métodos y equipos que suministran datos tanto de forma continua como discontinua.

1.2.1. Medidas discontinuas en planta

Estos métodos aportan información puntual del estado hídrico de la planta, y suelen limitarse a la realización de medidas en partes individuales de la planta (hojas y brotes). Además, requieren de un gran número de medidas para caracterizar el estado hídrico del cultivo (Jackson, 1982). Entre estos métodos se distinguen:

1.2.1.1. Potencial hídrico foliar

El potencial hídrico foliar (Ψ) es un parámetro frecuentemente utilizado para caracterizar el estado hídrico de la planta (Klepper, 1968; Goode y Higgs, 1973). Su valor depende de factores externos e internos a la propia planta (Jones, 1990), lo que provoca que sus niveles sufran variaciones importantes en función del momento del día (Elfving *et al.*, 1972; Ruiz-Sánchez *et al.*, 2007), de la fase de crecimiento (Winkel y Rambal, 1993; Ruiz-Sánchez *et al.*, 2007), de la edad de la hoja (Knipling, 1967) y de la orientación y posición que ocupan en el árbol (Sánchez-Blanco, 1994). Esta dependencia podría limitar su uso aunque su medida es universalmente admitida, como la forma más rápida, fiable y económica de evaluar el estado hídrico de las plantas (Ruiz-Sánchez y Girona, 1995).

Diversos investigadores han informado de la existencia de una estrecha correlación entre los valores del potencial hídrico foliar medido antes del alba (Ψ_a) y

el estado hídrico del suelo, debido a que la transpiración es mínima por la noche, alcanzándose un equilibrio hídrico entre el suelo y la planta en ese momento del día (Ritchie y Hinckley, 1975). Esta estrecha relación ha sido comprobada en distintos cultivos (Ruiz-Sánchez y Girona, 1995; Domingo *et al.*, 1996; Nortes *et al.*, 2005) lo que ha llevado a varios autores a proponer valores críticos de Ψ_a para iniciar el riego.

El equipo utilizado en campo para la medida de Ψ es la cámara de presión (Scholander *et al.*, 1965). El psicrómetro de termopares es otro instrumento de medida de Ψ y de sus componentes (Brown, 1976; Brown y Oosterhuis, 1992) y a diferencia de la cámara de presión se suele utilizar en laboratorio debido a que requiere un control extremadamente bueno de la temperatura para garantizar la fiabilidad de las medidas (Turner *et al.*, 2000). Además, requiere la confección previamente de una curva de calibrado, para transformar las lecturas obtenidas en potenciales hídricos. Existen evidencias experimentales de que Ψ medido con la cámara de presión es muy similar, numéricamente, al obtenido por psicrometría (Duniway, 1971).

La base teórica de la cámara de presión como método de medida no está tan clara como la del método del psicrómetro, ya que existe confusión en la literatura en relación con lo que verdaderamente mide, si es el Ψ de la muestra (hoja o brote) o el del xilema. Según Hsiao (1990) la designación de Ψ medido con la cámara de presión como Ψ del xilema, como frecuentemente aparece en la literatura, es erróneo, excepto en aquellos casos donde el equilibrio hídrico existía antes de la escisión, ya que en este caso no existe movimiento de agua y el Ψ de la hoja es igual al del xilema y la presión medida en la cámara (P) representa la tensión a la que se encontraba la savia en el xilema antes del corte. Como el potencial osmótico (Ψ_o) de la savia es muy pequeño generalmente se desprecia con lo que:

$$-P = \Psi_{\text{xilema}} = \Psi_{\text{hoja}} \text{ (sin transpiración)} \quad [1.1]$$

Cuando las hojas están transpirando lo anterior ya no se cumple. En este caso Ψ_{xilema} es mayor que el de las células de las hojas, en orden a las tasas de flujo y conductancias hidráulicas existentes. Sin embargo, después del corte y presurización,

y una vez alcanzada la presión de equilibrio, se establece a su vez un equilibrio hídrico en el conjunto de la muestra (hoja), igualándose Ψ_{xilema} al del resto de la hoja. Como el volumen del conjunto de las células del parénquima es mucho mayor que el del xilema de la hoja, Ψ promedio representa principalmente al Ψ de las células antes de la escisión, por lo que se concluye que la presión aplicada en hojas no cubiertas es una medida de Ψ de la hoja antes del corte (Hsiao, 1990; Domingo, 1994).

Es sobradamente conocido que el valor de Ψ depende de la demanda climática, mostrando una tendencia circadiana a lo largo del día, con valores más elevados a primera y a última hora del día y menores a mediodía (Sánchez-Blanco *et al.*, 1990). El valor de Ψ_a es más estable que el obtenido a mediodía solar (Ψ_{md}), pero con la limitación de no ser indicativo del estado hídrico de la planta en el momento de máxima demanda evaporativa. Sin embargo, nos informa del grado de estrés con el que la planta comienza el día (Ritchie y Hinckley, 1975; Aussenac y Valette, 1982; Ruiz-Sánchez *et al.*, 2000).

Por otro lado, Shackel *et al.* (1997) proponen al potencial del xilema del tallo, Ψ_t (hojas embolsadas durante al menos 2 horas antes de la medida, para impedir la transpiración), como indicador del estado hídrico de la planta. Su fundamento reside en que al no existir transporte de agua, Ψ medido coincide con el Ψ del xilema de la hoja antes de la escisión y por tanto, puede ser utilizado para estimar Ψ_t en el punto de unión de la hoja. Entre sus ventajas destacan su menor variabilidad, mejor correlación con el déficit de presión de vapor (DPV) y que refleja mejor la disminución de agua en el suelo que Ψ .

El valor umbral Ψ_t , correspondiente a un suministro hídrico adecuado, está alrededor de -0,8 MPa para especies frutales durante sus procesos fisiológicos sensibles y de -1,0 MPa para las especies más tolerantes (Villalobos *et al.*, 2002). Más concretamente y para árboles bien regados, Ψ_t alcanza valores a mediodía entre -0,4 y -1,0 MPa en nectarino (De la Rosa *et al.*, 2010) y -1,0 y -1,5 MPa en albaricoquero (Pérez-Sarmiento *et al.*, 2010).

Diversos autores han sugerido valores umbrales de Ψ para iniciar el riego en diferentes cultivos. Post y Sakovich (1986) fijan el momento de riego cuando Ψ disminuye 2-3 bares respecto al potencial de árboles bajo condiciones de capacidad de campo (Figura 1.1). Algunos autores prefieren Ψ_{md} a Ψ_t por su capacidad de cuantificar mejor el estrés hídrico a mediodía. Aunque existen estudios que demuestran que la sensibilidad al déficit hídrico, medida a partir de la intensidad de señal, es superior en Ψ_t que en Ψ (Goldhamer *et al.*, 1999; Ortuño *et al.*, 2006a).

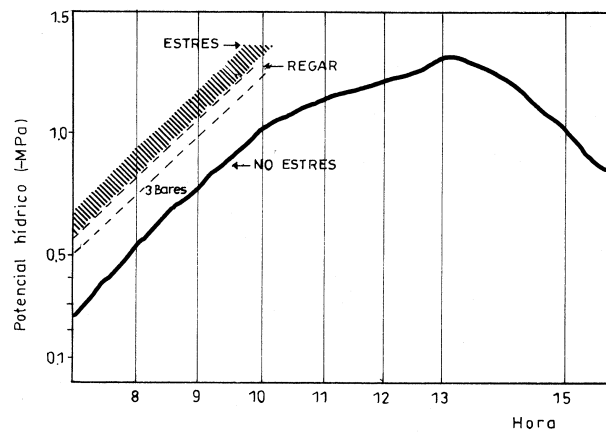


Figura 1.1. Evolución del potencial hídrico foliar en cítricos después de un riego (Post y Sakovich, 1986).

La respuesta agronómica de la planta al estrés hídrico puede estar mejor correlacionada a través de la integral de estrés (S_Ψ) que con los valores de Ψ o Ψ_t , ya que es un índice que expresa conjuntamente la intensidad y duración del estrés (Myers, 1988) mediante la siguiente ecuación:

$$S_\Psi = \left| \sum_{i=0}^{i=t} (\bar{\Psi}_{i,i+1} - \Psi_c) n \right| \quad (\text{MPa} \cdot \text{día}) \quad [1.2]$$

donde: $\bar{\Psi}_{i,i+1}$, es la media del potencial hídrico para el intervalo de medidas i , $i+1$; Ψ_c , el máximo potencial hídrico medido durante el periodo estudiado, y n el número de días en el intervalo.

El gran inconveniente que presentan las medidas de Ψ para su uso como indicador de riego es la dificultad de su automatización en campo, como demuestra la inexistencia de instrumentos con este fin.

1.2.1.2. Conductancia estomática

La conductancia estomática (g_s) es la variable que mide el grado de apertura de los estomas situados en las hojas, al regular el intercambio gaseoso con el ambiente que la rodea. Este indicador de estrés se ve afectado por una gran cantidad de factores, lo que dificulta su utilización. Así, sus valores dependen de la intensidad luminosa, la temperatura, la diferencia de humedad absoluta entre la hoja y el aire, la edad de la hoja, la concentración de CO_2 y el propio potencial hídrico (Jones, 1983; Ruiz-Sánchez *et al.*, 2000).

g_s puede medirse con un porómetro de difusión, usualmente de estado estacionario. Existen otros instrumentos de medida como el sistema de medida portátil de intercambio gaseoso CIRAS 2[®] (PP Systems, Hitchin, Hertfordshire, UK), pero no existen actualmente, instrumentos para la medida automatizada de g_s .

El estrés hídrico afecta a la apertura estomática, por lo que puede ser un índice del estado hídrico de la planta, además está bien correlacionada con la tasa de fotosíntesis (Farquhar y Sharkey, 1982; Harrison *et al.*, 1889; Yoon y Richter, 1990), la cual depende también del estado hídrico (Wong *et al.*, 1979). Las medidas de g_s son muy útiles para detectar la recuperación de las plantas después de un estrés hídrico (Gebre y Kuhns, 1992) y de una inundación (Savé y Serrano, 1986; Ruiz-Sánchez *et al.*, 1996; Domingo *et al.*, 2002). Además se han desarrollado modelos más o menos complejos de estimación de la transpiración en base a las medidas de unas pocas hojas (Williams *et al.*, 1996).

g_s muestra a lo largo del día una evolución circadiana, más pronunciada cuanto mayor es la demanda climática (Torrecillas *et al.*, 1988; Ruiz-Sánchez *et al.*, 2007). De esta forma, los estomas se abren con la salida del sol (aumento de la radiación fotosintéticamente activa, PAR) aumentando g_s y alcanzando su máximo entre las 10 y las 12 hora solar, tras lo cual disminuye progresivamente. El valor máximo de g_s se alcanza antes en condiciones de estrés hídrico, disminuyendo el tiempo en el que se mantiene la máxima apertura estomática (Henson *et al.*, 1982). Se ha comprobado en hojas de albaricoquero bajo condiciones de adecuado suministro hídrico que g_s muestra a partir de $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de radiación PAR los

valores máximos de intercambio gaseoso, valor que corresponde a la tercera parte del PAR máximo solar durante el periodo estudiado (Ruiz-Sánchez *et al.*, 2007). Similares valores de saturación lumínica han sido encontrados en cítricos tanto bajo condiciones ambientales naturales (Vu *et al.*, 1986) como en condiciones controladas (Syvertsen, 1984).

1.2.1.3. Crecimiento vegetativo

El crecimiento de las hojas y brotes es muy sensible al estrés hídrico (Hsiao y Bradford, 1983). Distintos estudios han demostrado cómo la disminución de potencial hídrico foliar por debajo de un valor umbral disminuye el crecimiento de ciertos órganos vegetativos (Boyer, 1968; Jordan, 1970; Pérez-Pastor *et al.*, 2009a), llegando incluso a no recuperar el tamaño perdido con respecto al de una planta bien regada si el déficit hídrico alcanzado es severo (Nortes, 2008). Los datos originados de estas medidas tienen una alta variabilidad y necesitan de un elevado número de determinaciones para mayor representatividad de la media.

1.2.2. Medidas continuas en planta

Estos métodos aportan una información continua del estado hídrico de la planta a partir de medidas indirectas. Con el almacenamiento de estos datos en un datalogger y su posterior procesamiento se podría automatizar el riego de una explotación. Para ello se necesita, al igual que en los métodos anteriormente descritos, del conocimiento de las variables climáticas reinantes en la explotación, al depender éstos de la demanda evaporativa del ambiente. Entre estos métodos se distinguen:

1.2.2.1. Temperatura del dosel vegetal

La temperatura del dosel vegetal puede ser usada como indicador del estado hídrico de la planta (Jackson, 1982; Turner, 1990), ya que mediante la transpiración se produce un descenso de la temperatura foliar con respecto a la del aire; por el contrario bajo un déficit hídrico los estomas se cierran produciéndose un aumento de la temperatura foliar (Gates, 1968) que puede ser detectado con un termómetro de infrarrojos. Ehrler *et al.* (1978) demostraron que las diferencias de temperatura

entre el aire y la hoja están relacionadas con el potencial hídrico de la hoja y con la demanda evaporativa del ambiente.

De esta forma, la temperatura foliar es un buen indicador del estado hídrico de la planta, pero requiere, al igual que los otros métodos, de la realización de numerosas medidas, que hoy día, gracias a la fabricación de nuevos sensores de termometría infrarroja, se pueden obtener de manera continua, registrando las medidas realizadas en un datalogger (Figura 1.2). Idso *et al.* (1981) y Jackson *et al.* (1981) propusieron la utilización de un índice de estrés hídrico, muy similar al obtenido por Hiler *et al.* (1974), a partir de la relación entre la diferencia de la temperatura foliar y del aire y el déficit de presión de vapor (CWSI, Crop Water Stress Index). El CWSI es una medida de la tasa de transpiración relativa, y su procedimiento de cálculo se encuentra en Jackson (1982) y Villalobos *et al.* (2002).

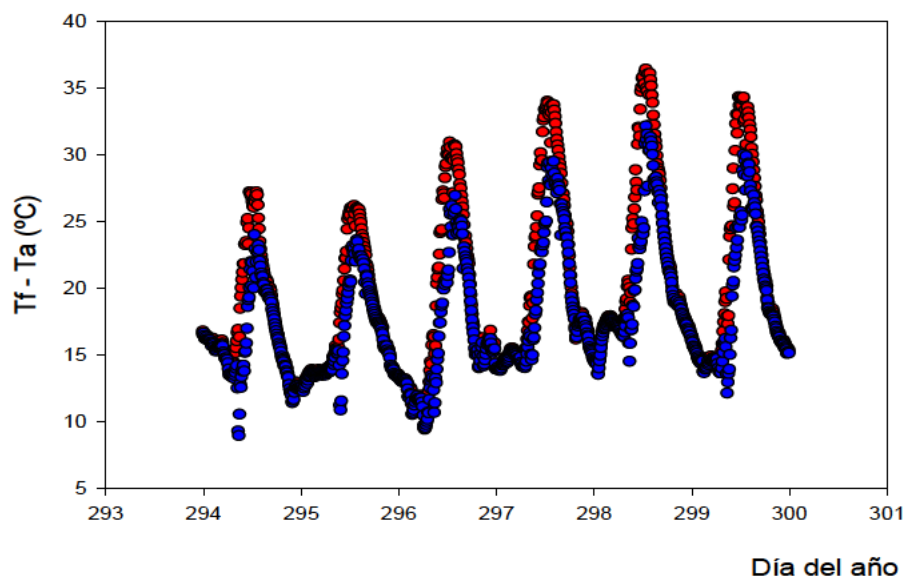


Figura 1.2. Evolución de la diferencia de temperaturas a mediodía entre las hojas y el aire ($T_f - T_a$) de nectarinos bien regados (círculos azules) y con estrés hídrico (círculos rojos). Los valores corresponden a la media de 3 repeticiones \pm ES (Pérez-Pastor, comunicación personal).

1.2.2.2. Flujo de savia

Otro indicador del estado hídrico de la planta al que se le está dedicando especial atención en estos últimos años y que está asociado a la absorción de agua por la planta es la medida del flujo de savia. Numerosos estudios han comprobado la utilidad de este indicador y de su elevada sensibilidad a la demanda climática (Cohen, 1991; Ameglio *et al.*, 1992; Moreno *et al.*, 1996; Alarcón *et al.*, 2000). Los

métodos actualmente disponibles están clasificados en tres grupos: método radial de calor constante (Granier, 1985), balance de calor (Valancogne y Nasr, 1989) y método de pulso de calor (Marshall, 1958).

En los últimos años, gracias a los avances en la electrónica e informática, se han desarrollado diferentes métodos basados en la interacción del flujo de savia bruta con el transporte de calor. Estos métodos están siendo utilizados con éxito en la estima de la transpiración de diversas especies, principalmente de árboles forestales y frutales (Cohen, 1991; Green y Clothier, 1995; Moreno *et al.*, 1996; González-Altozano, 1998; Domingo *et al.*, 1999; Alarcón *et al.*, 2000). El flujo de savia equivale a la transpiración en condiciones estacionarias y puede representar alrededor del 85% de la evapotranspiración en condiciones no limitantes de agua.

Este indicador presenta una evolución típica a lo largo del día, alcanzando el valor máximo al mediodía, cuando la radiación es máxima, y un mínimo durante la noche, coincidiendo con el cierre estomático. Una disminución progresiva de las tasas de transpiración para un cultivo y demanda determinada es indicativo de una situación de estrés hídrico (Figura 1.3).

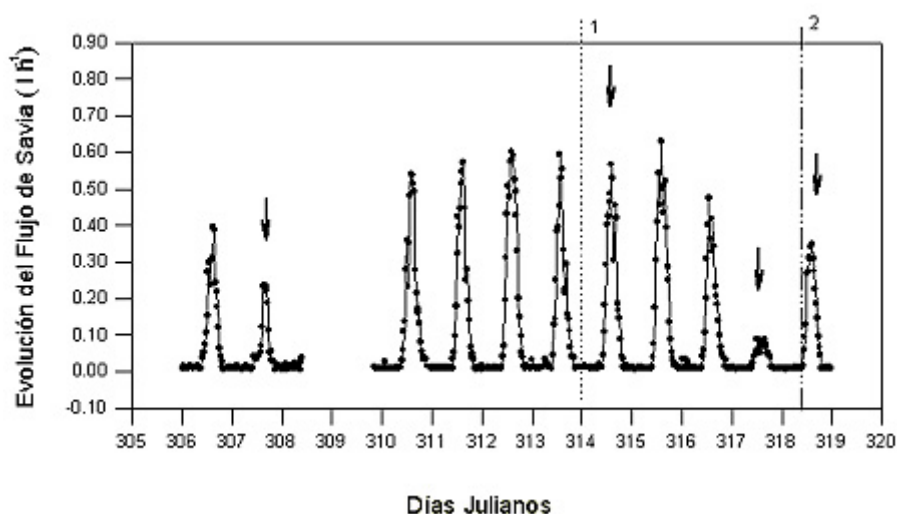


Figura 1.3. Evolución del flujo de savia en albaricoqueros jóvenes cultivados en maceta bajo invernadero. Las líneas discontinuas indican el momento de supresión (1) y reanudación del riego (2) (Domingo *et al.*, 1999).

La técnica de pulso de calor se puede utilizar en árboles a partir de diámetros de tronco de 6-8 cm y consiste en medir las variaciones de temperatura por encima y por debajo de una aguja insertada en el tronco mediante la que se aplican pulsos de

calor. Si se dispone de un control bien regado será posible determinar en qué momento se reduce la transpiración respecto a su valor máximo (Villalobos *et al.*, 2002).

1.2.2.3. Fluctuación del diámetro del tronco y del fruto

El registro continuo de las microvariaciones de tronco y ramas proporciona una valiosa información del crecimiento y estado hídrico de la planta, a la vez que abre expectativas esperanzadoras con relación al manejo del riego (Huguet, 1985). Son varios los trabajos que demuestran que las variaciones del diámetro de tronco y ramas pueden relacionarse con el estado hídrico de la planta (Klepper *et al.*, 1971; Baille *et al.*, 1992), bien a partir de la evolución en el tiempo de los diámetros máximo y mínimo diarios o a partir de la amplitud de la contracción diaria del tronco.

La evolución del diámetro de un órgano vegetal presenta dos componentes, una asociada al crecimiento del órgano y otra a la pérdida de agua. Las variaciones estacionales del diámetro del tronco dependen principalmente del proceso de crecimiento (Kozlowski y Winget, 1964). Sin embargo, a escala diaria también ocurren ciclos de contracción y expansión del diámetro del tronco (Kozlowski, 1967), en parte como consecuencia del efecto térmico (McCracken y Kozlowski, 1965), pero principalmente a causa de los cambios de contenido de humedad de los tejidos de la planta (Simonneau *et al.*, 1993). Así, a lo largo del día, la evolución típica del diámetro de tronco alcanza un valor máximo al final de la noche (MXTD - período en el que la hidratación de los órganos es máxima) y un valor mínimo (MNTD) a mediodía (Figura 1.4). La diferencia entre ambos valores, máxima amplitud, es denominada máxima contracción diaria del diámetro de tronco (MCD) y representa la difusión radial de agua de los tejidos de la corteza hacia el xilema (Parlange *et al.*, 1975), lo que genera una reducción progresiva del diámetro. La magnitud de MCD depende de varios factores, como son: i) el módulo de elasticidad y las propiedades de difusión del agua de los tejidos del floema (Parlange *et al.*, 1975; Gènard *et al.*, 2001), ii) espesor del floema y tamaño del árbol (Naor y Cohen, 2003; Intrigliolo y Castel, 2005) y iii) carga productiva (Moriani y Fereres, 2004; Intrigliolo y Castel, 2007), probablemente como consecuencia de las pérdidas

de agua por transpiración de los frutos (Berger y Selles, 1993; Link *et al.*, 1998). Tanto la magnitud de MCD como la tasa de crecimiento diario del tronco (TCD), diferencia de valores MXTD entre dos días consecutivos (Figura 1.4), representan una información valiosa sobre la intensidad del estrés hídrico alcanzado (Egea, 2008). El interés de utilizar uno u otro va a estar determinado, en gran medida, por las tasas de crecimiento del árbol. Así, en plantaciones adultas con bajas tasas de crecimiento se desaconseja el uso de TCD; en cambio, en plantaciones jóvenes, donde el objetivo es maximizar su crecimiento de cara a una pronta entrada en producción, ocurre lo contrario (Moriani y Fereres, 2002; Domingo *et al.*, 2005; Nortes *et al.*, 2005).

Ambos parámetros, derivados de la fluctuación continua del diámetro de tronco (FDT) a partir de sensores LVDT (linear variable displacement transducers), pueden ser fácilmente automatizados y utilizados en la programación del riego (Simonneau *et al.*, 1993; González-Altozano, 1998).

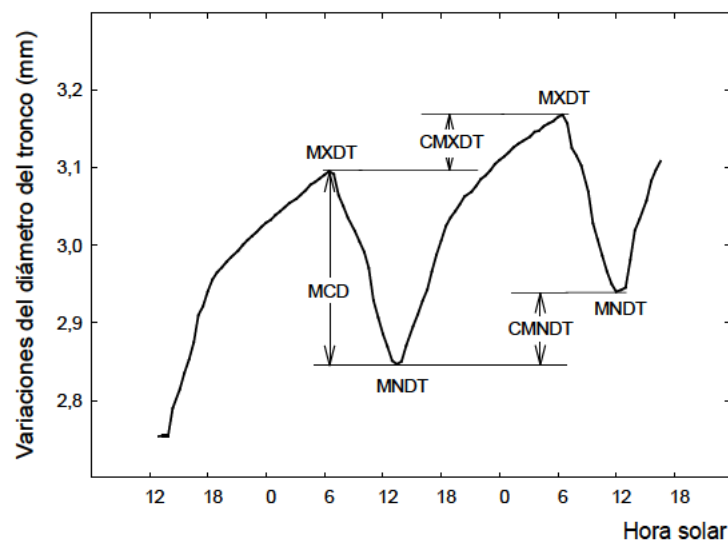


Figura 1.4. Parámetros derivados de las fluctuaciones del diámetro de tronco (FDT) durante 2 días consecutivos (Goldhamer y Fereres, 2001).

Oppenheimer y Elze (1941) y Furr (1955) propusieron la evolución del crecimiento del fruto como un índice para la programación del riego en cítricos. Así, Ebel *et al.* (1995) lo emplean como indicador para el cambio de riego, una vez alcanzado un valor umbral, en estrategias de riego deficitario controlado en manzana. Aunque estudios posteriores han presentado al fruto como un indicador

menos sensible que el tronco para ser utilizado en la programación del riego (Pérez-Pastor, comunicación personal).

1.3. Riego deficitario controlado

El riego deficitario controlado (RDC) es una estrategia de riego desarrollada en el cultivo del melocotonero y peral en Australia, y fundamentada en el uso del estrés hídrico para controlar el crecimiento vegetativo y su competición con el desarrollo del fruto (Chalmers *et al.*, 1981; Mitchell y Chalmers, 1982; Chalmers *et al.*, 1986). El RDC tiene un enfoque más fisiológico que el riego deficitario (RD) ya que contempla tanto la fenología del cultivo como su capacidad para resistir situaciones de déficit hídrico. En el tiempo transcurrido desde que los investigadores australianos introdujeran el RDC ha quedado claro que con esta estrategia de riego se puede maximizar la producción por unidad de agua aplicada (Domingo *et al.*, 2005). Los mejores resultados se han obtenido en cultivos leñosos y hortícolas de gran valor comercial cuando son cultivados en climas áridos y semiáridos (English, 1990; Pereira *et al.*, 2002; Jones, 2004; Fereres y Soriano, 2007; Ruiz-Sánchez *et al.*, 2010).

Los objetivos principales de RDC son maximizar la productividad del agua (Fereres y Evans, 2006; Fereres y Soriano, 2007) y estabilizar las producciones (Zhang y Oweis, 1999).

El RDC se basa en la idea de reducir e incluso suprimir, cuando las lluvias proporcionen una determinada humedad en el suelo (Geerts y Raes, 2009), los aportes hídricos en aquellos períodos fenológicos en los que un déficit hídrico controlado no afecta sensiblemente a la producción ni a la calidad de la cosecha, cubriendo plenamente la demanda hídrica de la planta durante el resto del ciclo del cultivo. El RDC se aplica generalmente en aquellos estados del ciclo de cultivo en los que el crecimiento reproductivo es relativamente lento y el crecimiento vegetativo y otros procesos de la planta pueden ser afectados, traduciéndose frecuentemente dichos efectos en una mejora de la calidad del fruto (Ruiz-Sánchez *et al.*, 2010).

Numerosos autores han confirmado que el RDC mejora las características físicas y químicas del fruto en un elevado número de especies frutales como es el caso del albaricoquero (Pérez-Pastor *et al.*, 2009a), jinjolero (Ma *et al.*, 2006; Cui *et al.*, 2008), limonero (Domingo *et al.*, 1996), mandarino (González-Altozano y Castel, 1999; Verreyne *et al.*, 2001), mango (Spreer *et al.*, 2007), manzano (Ebel *et al.*, 1993; Kilili *et al.*, 1996), melocotonero (Chalmers *et al.*, 1981; Mitchell y Chalmers, 1982; Crisosto *et al.*, 1994; Gelly *et al.*, 2004; Buendía *et al.*, 2008), naranjo (Castel y Buj, 1990), níspero (Hueso y Cuevas, 2008), olivo (Gómez-Rico *et al.*, 2007; Iniesta *et al.*, 2009), parral (El-Ansary y Okamoto, 2008), pistacho (Goldhamer, 1997) y vid (dos Santos *et al.*, 2007; Chalmers *et al.*, 2008; Cooley *et al.*, 2008).

Otras ventajas que promueve el riego deficitario son la disminución del riesgo de enfermedades fúngicas al descender la humedad ambiental que envuelve al cultivo (Cicogna *et al.*, 2005; Pérez-Pastor *et al.*, 2007), el descenso en la afección de plagas (Costello, 2008), la reducción de pérdidas de nutrientes por percolación profunda, disminuyendo la contaminación de las aguas subterráneas (Sun *et al.*, 2006; Cabello *et al.*, 2009), y el adelanto de la fecha de floración y a su vez el aumento en la precocidad de la cosecha, obteniéndose un fruto de mayor valor económico (Cuevas *et al.*, 2007, 2009; Geerts y Raes, 2009). Sin embargo, también presenta algunas limitaciones que pueden condicionar su éxito, como son: el requerir un conocimiento preciso de la respuesta del cultivo al déficit hídrico en cada período fenológico (Hsiao, 1973; Fereres y Goldhamer, 1990; Girona, 2002); la necesidad de disponer del agua necesaria tanto en los períodos críticos como durante el resto del ciclo, lo que no es siempre posible en períodos de escasez de agua (Zhang y Oweis, 1999; Fereres y Soriano, 2007; Geerts *et al.*, 2008); el que exista una cierta separación entre los procesos de crecimiento vegetativo y el del fruto (Sánchez-Blanco y Torrecillas, 1995), y la incidencia de la salinización del suelo en los momentos de aplicación del déficit hídrico (Ragab, 1996; Sarwar y Bastiaanssen, 2001; Hsiao *et al.*, 2007; Geerts *et al.*, 2008). Además hay que tener en cuenta que este tipo de estrategias no son aconsejables en árboles jóvenes ya que el objetivo principal en este tipo de plantaciones es maximizar el crecimiento para que los árboles alcancen

el estado adulto lo antes posible, lo que implica evitar cualquier déficit hídrico en todo momento (Nortes *et al.*, 2005; Ruiz-Sánchez *et al.*, 2010).

La delimitación precisa del inicio y final de los períodos críticos es clave en la aplicación de RDC. Sin embargo, su identificación concreta resulta difícil. En frutales caducifolios los periodos críticos se localizan fundamentalmente en las fases de floración y cuajado, en la fase III del crecimiento del fruto y en postcosecha. Así, el período más sensible al déficit hídrico en albaricoquero (Torrecillas *et al.*, 2000), manzano (Naor *et al.*, 1997; Mpelasoka *et al.*, 2001), melocotonero (Mitchell y Chalmers, 1982; Huguet *et al.*, 1990a; Cohen *et al.*, 2001) y peral (Mitchell *et al.*, 1984, 1989) es la última fase de rápido crecimiento del fruto (Fase III); en cambio en ciruelo, Lampinen *et al.* (1995) y posteriormente Intrigliolo y Castel (2005) lo sitúan en la fase del endurecimiento del hueso. En albaricoquero temprano, Ruiz-Sánchez *et al.* (1999) señalan, además, como período crítico los dos primeros meses poscosecha; sin embargo en melocotonero este período es trasladado al mes de agosto, por la posibilidad de inducir defectos físicos en los frutos de la siguiente campaña (Naor *et al.*, 2005; Johnson y Phene, 2008). Girona (1992) y Cohen *et al.* (1993) indican en almendro y nogal, respectivamente, que un estrés hídrico después de la cosecha tiene un efecto drástico sobre la producción del año siguiente, al reducir el número de frutos por árbol, y que la fase de acumulación rápida en materia seca del grano (fase IV) es muy poco sensible al déficit hídrico. Por otro lado, Marsal *et al.* (1997) afirman que la alta sensibilidad al déficit hídrico del avellano, reflejada tanto en su producción total como en la calidad, aconseja satisfacer sus requerimientos hídricos totales.

En olivo, Moriana *et al.* (2003) y Orgaz y Fereres (2004) señalan las fases de floración y fructificación como las más sensibles al déficit hídrico y al igual que Goldhamer (1999) la del endurecimiento del hueso como la más resistente.

En cítricos se consideran dos los períodos críticos, uno que abarca desde la floración hasta el cuajado, donde el déficit hídrico condiciona el número de frutos, y otro que corresponde a la fase de rápido crecimiento del fruto y que determina el tamaño final de los mismos (Domingo *et al.*, 1996; González-Altozano y Castel, 1999), si bien en variedades tardías se ha comprobado que la aplicación de un déficit

hídrico durante la primera mitad de este último período no induce mermas en la producción.

El RDC ha sido aplicado con éxito en muchas especies frutales, entre las que destacan los cultivos del almendro (Goldhamer y Shackel, 1989; Goldhamer y Viveros, 2000; Romero *et al.*, 2004b; Girona *et al.*, 2005a, Egea *et al.*, 2012), albaricoquero (Pérez-Pastor *et al.*, 2009a), ciruelo (Intrigliolo y Castel, 2005), limonero (Domingo *et al.*, 1996); mandarino (González-Altozano y Castel, 1999), manzano (Ebel *et al.*, 1995), melocotonero (Chalmers *et al.*, 1981; Mitchell y Chalmers, 1982; Li *et al.*, 1989; Goldhamer *et al.*, 2002; Girona *et al.*, 2005b; Dichio *et al.*, 2007), naranjo (Goldhamer y Salinas, 2000; Pérez-Pérez *et al.*, 2008a, b), olivo (Moriani *et al.*, 2003; Gómez-Rico *et al.*, 2007; Iniesta *et al.*, 2009), parral (El-Ansary y Okamoto, 2008), peral (Mitchell *et al.*, 1984, 1989; Chalmers *et al.*, 1986; Naor *et al.*, 2006), pistacho (Goldhamer y Beede, 2004; Guerrero *et al.*, 2006) y vid (dos Santos *et al.*, 2007; Chalmers *et al.*, 2008; Cooley *et al.*, 2008).

1.4. Programación del riego a partir de sensores en planta

1.4.1. Sensibilidad de los parámetros derivados de la fluctuación del diámetro del tronco

Ψ_t es un indicador tradicionalmente usado para definir el estado hídrico de la planta, pero a pesar de su elevada sensibilidad al déficit hídrico, la dificultad para registrar su medida continua imposibilita su uso en la programación automática del riego. Por ello, los parámetros derivados de FDT, y más concretamente MCD (Figura 1.4), es considerado un indicador de gran interés para el establecimiento de protocolos de riego con fines de automatización.

La sensibilidad al déficit hídrico de los parámetros derivados de FDT, entendida como la relación entre el valor real y el correspondiente a árboles sin limitación hídrica, va a depender de la edad y período fenológico en el que se encuentre el cultivo. Así, en árboles jóvenes los parámetros MXTD y MNTD son muy útiles a la hora de detectar déficit hídrico, debido al crecimiento elevado y continuado del tronco durante gran parte del año. Nortes *et al.* (2005) observaron un crecimiento del tronco prácticamente constante durante todo el ciclo de cultivo de

almendros jóvenes, y comprobaron que un déficit hídrico durante la fase IV del ciclo del almendro (junio-agosto) producía una ralentización del crecimiento, reflejándose en una disminución de MXTD y TCD y un incremento de MCD. Durante la primera semana de aplicación del déficit, TCD mostró valores de sensibilidad de 2,93, muy superiores a los presentados por MCD (1,44). Este hecho también ha sido observado en olivos jóvenes, donde TCD presentó mayor sensibilidad que MCD para detectar el estrés hídrico (Moriani y Fereres, 2002). Goldhamer y Fereres (2001) proponen utilizar la evolución de MNTD en el establecimiento de protocolos de manejo del riego en melocotoneros jóvenes y MCD en almendros adultos. En este sentido Goldhamer *et al.* (1999) encontraron que MNTD fue el parámetro que antes detectó el inicio del déficit hídrico en melocotonero, aunque MCD fue el que mejor reflejó la magnitud del estrés hídrico aplicado. Por otro lado, Intrigliolo y Castel (2007) trabajando en vid, observaron que tanto MCD como TCD no mostraron sensibilidad alguna al déficit hídrico durante el período posterior al envero. Sin embargo, fueron sensibles al déficit antes del envero (TCD > MCD) y ambos presentaron cierta correlación con Ψ_t .

En el cultivo del ciruelo, estos mismos autores observaron mayor sensibilidad de MCD que TCD para detectar déficit hídrico, si bien aconsejan el uso de Ψ_a y Ψ_t como indicadores de estrés hídrico en ciruelo, al correlacionar más estrechamente con el crecimiento del fruto (Intrigliolo y Castel, 2006). En general MCD ha sido, de los parámetros de planta fácilmente automatizables, el más propuesto para su utilización en la programación del riego, como lo demuestran los trabajos realizados en almendro por Fereres y Goldhamer (2003), Goldhamer y Fereres (2004), Egea *et al.* (2009), Pérez-Pastor *et al.* (2009b), en limonero adulto por Ortuño *et al.* (2006a) y García-Orellana *et al.* (2007), en olivo por Moreno *et al.* (2006), en melocotonero por Conejero (2008) y en mandarino por Vélez *et al.* (2007).

1.4.2. Líneas de referencia

El valor de los diferentes indicadores del estado hídrico de la planta depende, en gran medida, del contenido de agua en el suelo y de la demanda evaporativa del ambiente. En condiciones no limitantes de agua en el suelo y en árboles con

características similares su valor dependerá de la demanda climática incrementándose con el aumento de la misma.

Por esta razón diversos autores manifiestan la necesidad de normalizar los valores absolutos reales del indicador en cuestión con fines de programación del riego (Egea *et al.*, 2009; Ortuño *et al.*, 2010). De esta forma surge el concepto ideado por Golhamer y Fereres (2001) denominado intensidad de señal (IS), que para el caso de MCD vendría definido como la relación entre el valor real de MCD y el procedente de árboles bien regados, $MCD_{referencia}$ ($IS = MCD_{real} / MCD_{referencia}$). Así un valor de IS igual a la unidad indicará ausencia de estrés hídrico y un valor superior a la unidad estrés hídrico, que será tanto más severo cuanto más elevado sea IS. Ahora bien, cuando se sobrepasa un determinado nivel de déficit hídrico, puede darse el caso de que MCD disminuya y por lo tanto IS, haciendo inservible la interpretación anterior (Ortuño *et al.*, 2006a, 2010).

Los valores $MCD_{referencia}$ pueden obtenerse a partir de un número determinado de árboles ubicados en la explotación frutícola siempre y cuando se aseguren condiciones no limitantes de agua en el suelo o bien a partir de líneas de referencia obtenidas en años anteriores (MCD *vs* variable climática). El hecho de mantener árboles regados por encima de sus necesidades dificulta en gran medida el manejo del riego en plantaciones comerciales, de ahí el interés de poder contar con líneas de referencia validadas. Como el valor de MCD depende de la fase fenológica en la que se encuentra el cultivo (Gènard *et al.*, 2001; Marsal *et al.*, 2002; Fereres y Goldhamer, 2003; Intrigliolo y Castel, 2004; Egea *et al.*, 2009) podría ser necesario disponer de una línea diferente para cada fase. Estudios recientes recomiendan tener en cuenta la influencia de factores como el nivel de carga productiva (Intrigliolo y Castel, 2007; Puerto *et al.*, 2010), tamaño de los árboles y espesor de corteza (Intrigliolo y Castel, 2006) y la edad del árbol (Egea *et al.*, 2009) en la elaboración de las líneas de referencia.

Ortuño *et al.* (2010) presentan una recopilación de numerosas líneas de referencias obtenidas para diferentes especies leñosas. Mientras que en cítricos, distintos estudios sugieren que la variable climática que mejor predice MCD es la temperatura media diaria (Ortuño *et al.*, 2006b, 2009a), en olivo es el DPV y la

temperatura obtenidos a mediodía, es decir, cuando la demanda climática es más elevada (Moreno *et al.*, 2006). Igualmente sucede con el almendro, en el que la mejor correlación se obtuvo entre MCD y el DPV medio de las horas centrales del día (Egea *et al.*, 2009).

1.4.3. Ejemplos de programación del riego a partir de MCD

La programación del riego basada en los valores procedentes de un indicador del estado hídrico de la planta como MCD ha sido probada en distintos cultivos. En este apartado se pretende describir los procedimientos utilizados en cada uno de ellos y diagnosticar el estado actual de conocimientos en esta materia.

Ortuño *et al.* (2009b) programaron el riego de limoneros adultos en base a IS, para mantenerla en torno a 1 durante todo el ciclo del cultivo. Para ello cuando fue inferior al valor umbral durante al menos 2 de 3 días consecutivos, disminuyeron el volumen de riego un 10% respecto al último riego realizado. De forma contraria, aumentaron el volumen de riego en idéntico porcentaje cuando IS fue superior al umbral fijado. Los resultados obtenidos indicaron que con este método de programación es posible reducir los volúmenes de riego respecto a árboles control programados en base a ETo sin afectar a la producción ni a la calidad de la cosecha. Estos mismos autores proponen incrementar la frecuencia en la programación del riego para disminuir la variabilidad en los valores de IS. Similar recomendación propone Conejero (2008) en melocotonero extratemprano, aumentar la frecuencia de programación del riego a nivel diario, y disminuir el porcentaje de variación del volumen de riego destinado a corregir el valor de IS a un 3%.

En mandarino Clemenules, Vélez *et al.* (2007) con una programación del riego consistente en mantener IS en 1,25 durante toda la campaña de riego, consiguieron ahorros de agua del 15 % sin afectar a la producción ni al peso medio del fruto.

En almendro, Goldhamer y Fereres (2004) programaron dos tratamientos de riego consistentes en mantener una IS de 1,75 y 2,75 a partir de cambios de $\pm 10\%$ en los aportes hídricos. Así, para valores de IS en torno a 1,75, Ψ_t osciló entre -0,8 y -1,1 MPa durante la mayor parte del verano y cuando la IS perseguida fue de 2,75

Ψ_t estuvo entre -1,3 y -1,5 MPa, lo que supuso reducciones del 4,5% y 42% en los volúmenes de riego respecto al criterio seguido por el agricultor (programada en base a Ψ_t) y del 17% y 49% en relación a la ET_c , respectivamente. El estrés hídrico generado por ambos tratamientos adelantó la recolección de la cosecha, sin que mermase la producción en IS 1,75 respecto al agricultor. El tratamiento IS 2,75 redujo su producción en un 10% respecto a IS 1,75. Los autores concluyen que es posible programar el riego del almendro en base IS como único indicador.

En un estudio realizado en manzano por Bonany y colaboradores se programó el riego para mantener un valor de -15 kPa de potencial hídrico del suelo y un valor absoluto de 200 μm de MCD durante toda la estación de riego. De esta forma se consiguió un ahorro del 38% de agua con respecto a un tratamiento control, regado para cubrir las necesidades hídricas del cultivo, sin afectar ni a la producción ni a la calidad del fruto (sin publicar, citado por Ortuño *et al.*, 2010).

Después de describir los escasos estudios realizados sobre programación del riego en base a MCD, hay que señalar, que para que este método de programación sea eficaz, es necesario explotar las ventajas que reúne este indicador del estado hídrico de la planta en cuanto a sensibilidad al déficit hídrico, registro continuo de datos y posibilidades de automatización del riego. Para ello, se debe disponer de un sistema de riego (cabezal) equipado con un software capaz de modificar de forma diaria o casi diaria los aportes de agua necesarios para mantener los valores umbrales de IS dentro del rango deseado.

2.- Justificación y Objetivos

Thomas Robert Malthus en su *Ensayo sobre el principio de la población* (1798) predijo que llegaría un momento en que la producción de alimentos no sería suficiente para satisfacer a todos los habitantes del planeta. Pero la revolución verde, iniciada a mediados de los años sesenta por el agrónomo estadounidense Norman Borlaug (Premio Nobel de la Paz por esta iniciativa) con el objetivo de combatir la situación de hambruna de las regiones más pobres del planeta, permitió incrementar las producciones. Tiempo después, se vieron los efectos negativos del monocultivo, el empleo excesivo de fertilizantes y plaguicidas, así como del regadío excesivo, lo que dio lugar a restaurar una idea de agricultura más respetuosa con el medioambiente. En este sentido, la Política Agraria Común prioriza en la actualidad el respeto al medioambiente y la seguridad alimentaria, frente a la idea productivista con que nació. No sólo se trata de mantener altas producciones, sino de llevar a cabo técnicas de cultivo tales que los ecosistemas no se vean perjudicados y de optimizar recursos finitos como el agua. Así, el adecuado manejo del riego toma gran importancia por el gran efecto que tiene sobre el ecosistema. Esto unido al incremento en la demanda de agua y alimentos debido al continuo crecimiento de la población, que va acompañado de la limitación de agua dulce necesaria para el riego, hace imprescindible producir más alimentos por cada m³ de agua empleada, mejorando de esta forma la eficiencia en el uso del agua de riego (FAO, 2007b).

En zonas semiáridas como el sureste español la escasa disponibilidad de recursos hídricos implica, en ocasiones, el empleo de aguas de pozo, caracterizadas frecuentemente por su elevada salinidad. En otros casos su mezcla con agua procedente del trasvase Tajo-Segura permite abastecer una mayor superficie cultivable. Aún así, la disponibilidad de agua sigue siendo escasa para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos, lo que nos obliga a poner en práctica estrategias de riego deficitario.

La programación del riego basada en métodos tradicionales como el balance hídrico del suelo (Mc Gowan y Williams, 1980; Vachaud *et al.*, 1981; Johnsson y Jansson, 1991) o el cálculo de la evapotranspiración potencial (Renquist, 1987; Raghuwanshi y Wallender, 1997) presentan incertidumbres en el establecimiento de la cantidad de agua y el momento de aportarla derivadas de la distribución radicular,

la arquitectura y edad de la planta. Así, el uso de indicadores del estado hídrico de la planta nos aportaría una información que minimizaría estas incertidumbres. Incluso algunos de estos indicadores nos podrían proporcionar medidas continuas para ser utilizadas en la automatización del riego.

Existe un gran número de ensayos en especies arbóreas que han confirmado la sensibilidad de los parámetros derivados de las medidas continuas de diámetro de tronco a la disponibilidad de agua en el suelo cuando son sometidas a diferentes regímenes hídricos (Huguet *et al.*, 1990b; Ginestar y Castel, 1996a; Goldhamer *et al.*, 1999; Goldhamer y Fereres, 2001; Moriana y Fereres, 2002; Goldhamer *et al.*, 2003; Remorini y Massai, 2003; Intrigliolo y Castel, 2004; Nortes *et al.*, 2005), si bien su empleo en programación de riego implica la necesidad de experimentación previa para buscar valores de referencia del cultivo.

Tal y como se ha definido, RDC es una estrategia de riego que propicia el ahorro de agua, para ello es necesario conocer la fase fenológica más idónea para aplicar el déficit, su duración e intensidad.

A partir de estas premisas y de forma general, el objetivo principal de esta Memoria de Tesis fue evaluar la utilidad de los sensores del estado hídrico de la planta para optimizar el manejo del riego en mandarino y almendro. Para la consecución de este objetivo se establecieron los siguientes objetivos parciales:

1. Optimización del riego deficitario controlado en mandarino cv. Fortune durante tres campañas (2005-06, 2006-07 y 2007-08), a partir de la información suministrada por distintos indicadores del estado hídrico de la planta, y su posterior recuperación (2008-09). Para ello se evaluó la respuesta agronómica y fisiológica del cultivo y la incidencia de la salinidad.
2. Evaluación de los indicadores del estado hídrico del mandarino y del almendro. Para ello se estudió el establecimiento de líneas de referencia en ambos cultivos con el propósito de evitar el mantenimiento de árboles sin limitación de agua en el suelo en la explotación, así como la evaluación de la programación del riego basada en la intensidad de señal de la MCD en almendro cv. Marta.

3. Métodos y equipos de medida

3.1. Introducción

En este capítulo se describen los métodos y equipos utilizados en la medida de las variables que caracterizan las condiciones de clima, suelo y planta de los ensayos realizados en los cultivos de mandarino y almendro, los que son objeto de la presente Memoria de Tesis.

3.2. Clima

Las variables meteorológicas reinantes se obtuvieron a partir de dos estaciones agroclimáticas próximas a las parcelas experimentales e integradas en la red del Servicio de Información Agraria de Murcia (SIAM). En el ensayo del almendro se utilizaron los datos climáticos registrados por la estación CA12 - 'La Palma', ubicada en la Estación Experimental Agroalimentaria 'Tomás Ferro' de la Universidad Politécnica de Cartagena (ESEA-UPCT, Fotografía 3.1) y en el ensayo del mandarino los de la estación CA52 - 'La Aljorra'. Las variables controladas fueron: temperatura (T), humedad relativa (HR), radiación solar (Rs), velocidad del viento (Vv) y precipitación (P) y los sensores para su medida los indicados en la tabla 3.1. A partir de estas variables se obtuvo la evapotranspiración de referencia (ET_o , Allen *et al.*, 1998).



Fotografía 3.1. Detalle de la estación agroclimática 'La Palma' (CA12).

En el ensayo del mandarino T y HR se obtuvieron a partir de una sonda HMP45C ubicada en la misma parcela experimental (Fotografía 3.2).



Fotografía 3.2. Sonda HMP45C instalada en la parcela experimental de mandarino

Tabla 3.1. Características de los sensores utilizados en las estaciones climáticas, ‘La Palma’ (CA12) y ‘La Aljorra’ (CA52).

Medida	Denominación	Marca	Modelo
Temperatura y Humedad relativa	Termohigrómetro	VAISALA	HMP45AC
Velocidad viento	Anemoveleta	YOUNG	05103-5
Radiación solar	Radiómetro	SKYE	SKS 1110
Lluvia	Pluviómetro	CAMPBELL	ARG100

Fuente: www.siam.imida.es

3.2.1. Déficit de presión de vapor

El déficit de presión de vapor del aire (DPV) se calculó a partir de datos de T y HR, según las ecuaciones:

$$DPV = e_s - e_a \quad (\text{kPa}) \quad [3.1]$$

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 \times T}{T + 237,3}\right) \quad (\text{kPa}) \quad [3.2]$$

$$e_a = e_s \times \left(\frac{HR}{100}\right) \quad (\text{kPa}) \quad [3.3]$$

donde: e_s es la presión de vapor a saturación a la temperatura del aire (kPa); e_a la presión de vapor actual (kPa); T la temperatura (°C) y HR la humedad relativa (%).

3.2.2. Integral térmica

La integral térmica (IT) estima la posible relación existente entre la duración de cada periodo fenológico de las plantas y la acumulación de calor. Los modelos desarrollados con este fin han sido varios. Así, Richardson *et al.* (1975) desarrollaron un modelo lineal en función de una temperatura base, considerada como aquella por debajo de la cual no existe actividad vegetativa en la planta, y un límite superior por encima del cual los frutales detienen su desarrollo. Según este modelo, un grado hora de crecimiento, o según terminología inglesa *growing degree hour* (GDH), se definió como 1 hora a una temperatura de 1 °C por encima de la temperatura base, asumiendo aquellas temperaturas por encima del límite superior como no efectivas. La IT se obtendría al sumar los GDH del periodo considerado.

Años después, Richardson *et al.* (1982) desarrollaron un modelo curvilíneo asimétrico que representaba más estrechamente la respuesta normal de la planta al ambiente que los modelos lineales. Este modelo, denominado con el acrónimo ASYMCUR (asymmetric curvilinear model), queda definido por tres temperaturas cardinales: temperatura base (T_b), óptima (T_o) y crítica (T_c), sin crecimiento vegetativo por encima de ésta última.

El modelo ASYMCUR consiste en dos ecuaciones:

1. La primera ecuación determina la acumulación GDH a temperaturas entre la temperatura base y la óptima:

$$GDH = \frac{F \times A}{2} \left(1 + \cos \left(\pi + \pi \frac{T_h - T_b}{T_o - T_b} \right) \right) \quad [3.4]$$

donde: T_b (°C) es la temperatura horaria, F es un factor de estrés que puede usarse para representar varias formas de estrés en planta, se asume 1 para árboles sin estrés, y A es la amplitud de la curva ($T_o - T_b$).

2. La segunda ecuación se desarrolló para describir la acumulación efectiva de GDH a temperaturas por encima del óptimo:

$$GDH = F \times A \left(1 + \cos \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \times \frac{Th - To}{Tc - To} \right) \right) \quad [3.5]$$

El modelo ASYMCUR ha sido el empleado para estimar las necesidades de calor requeridas para completar los distintos períodos fenológicos del cultivo en la presente Memoria.

3.3. Suelo

3.3.1. Estado hídrico

El seguimiento del estado hídrico del suelo se realizó a partir de las lecturas del potencial matricial del agua en el suelo (Ψ_m), mediante tensiómetros de vacuómetro tipo Bourdon (mod. Irrometer INC) colocados a 30 y 70 cm de profundidad y a 25 cm del emisor (Fotografía 3.3).

El contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v) se determinó a partir de una sonda capacitiva portátil (Diviner 2000®, Sentek Pty. Ltd.). Las medidas se tomaron cada 10 cm hasta una profundidad de 90 cm. Los valores obtenidos se usaron para calcular el contenido relativo de agua extraíble (CRAE), según Granier (1987):

$$CRAE = \frac{R - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \quad [3.6]$$

donde: R (mm m^{-1}) es el contenido real de agua en el suelo en el momento de medida; R_{\min} (mm m^{-1}), el contenido mínimo de agua en el suelo obtenido en condiciones de seco y R_{\max} (mm m^{-1}), el contenido de agua en el suelo a capacidad de campo.

3.3.2. Salinidad

Para la determinación del contenido salino de las muestras de suelo se siguió el método oficial de preparación de la pasta saturada y separación del extracto. La concentración salina de la solución del suelo se expresó en valores de conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEe), en dS m^{-1} y referidos a 25 °C. Para la obtención de la pasta saturada se colocó en un recipiente una cantidad de suelo de

aproximadamente 250 g, a los que se añadió agua destilada lentamente, mezclándola con una espátula íntimamente hasta alcanzar el estado de saturación. Una vez alcanzado el punto de saturación se dejó en reposo al menos cuatro horas y posteriormente se transfirió la pasta a un embudo Büchner colocado en un bastidor de succión conectado a una bomba de vacío de diafragma (KNF Neuberger, Serie Laboport, mod. N 820.3 AT.18 - Alemania). El extracto de saturación se recogió en un recipiente donde se determinó C_{Ee} con un conductímetro (Crison Instrument S.A., modelo GLP 31).

Para la determinación de la salinidad presente en el suelo se tomaron muestras de suelo a 20 cm del gotero (en la zona de humectación) y a 50 cm (fuera de la zona de humectación), a las profundidades de 0 a 30 cm y de 30 a 60 cm. Adicionalmente, y de forma semanal se muestreó la solución del suelo con sondas de succión (Irrometer INC) situadas a 30 cm de profundidad y a 20 cm del punto de goteo (Fotografía 3.4).



Fotografía 3.3. Detalle de la ubicación del tensiómetro respecto al gotero.



Fotografía 3.4. Sondas de succión instaladas en parcela.

3.4. Planta

3.4.1. Estado hídrico

El estado hídrico de la planta se evaluó a partir de Ψ_{md} y sus componentes, de Ψ_t , de los parámetros derivados de FDT y de los de intercambio gaseoso a escala foliar.

3.4.1.1. *Potencial hídrico foliar a mediodía y sus componentes*

Ψ_{md} se midió con cámara de presión (Soil Moisture Equip. Corp., modelo 3000; Fotografía 3.5), de acuerdo al procedimiento y recomendaciones descritos por Scholander *et al.* (1965), Turner (1988) y Hsiao (1990). Para la determinación del potencial osmótico (Ψ_o) se tomaron hojas maduras del tercio medio del árbol, adyacentes a las utilizadas en las medidas de Ψ_{md} . Una vez limpias de restos de polvo se envolvieron en papel de aluminio e inmediatamente después se sumergieron en nitrógeno líquido (-198 °C) para su traslado al laboratorio y conservación en congelador a -40 °C. Para la realización de las medidas las muestras se descongelaron a temperatura ambiente, y posteriormente se centrifugaron a 10000 rpm (Centrífuga MPW-250, MED instrument, Johannesburgo, Sudáfrica) para extraer la savia celular. La osmolalidad fue determinada en una alícuota de 0,5 ml con un osmómetro (Micro-Osmometer Type 13/13DR-Autocal, Roebbing Messtechnik, Berlin) calibrado con una solución patrón de osmolalidad conocida (300 mmol kg⁻¹) y agua destilada (0 mmol kg⁻¹). El potencial de presión (Ψ_p) se obtuvo por diferencia entre el potencial hídrico foliar y el potencial osmótico:

$$\Psi_p = \Psi - \Psi_o \quad [3.7]$$

Las medidas del potencial osmótico a máxima saturación (Ψ_o^{100}) se realizaron de forma similar a Ψ_o pero con hojas previamente saturadas. Para ello, inmediatamente después de ser muestreadas se colocaron en vasos con sus peciolo introducidos en agua destilada y mantenidas en oscuridad durante 24 h, tras lo cual se congelaron en nitrógeno líquido durante 24 h.

3.4.1.2. *Potencial hídrico de tallo a mediodía*

Ψ_t se determinó en hojas sanas, adultas y sombreadas, próximas a ramas principales con cámara de presión. Las hojas fueron envueltas con una lámina de polietileno negro y cubiertas con papel de aluminio al menos dos horas antes de la medida. Las medidas se realizaron entre las 11:00 y 13:00 horas solar. El procedimiento y recomendaciones seguidos en la realización de las medidas fueron los indicados para las medidas de Ψ_{md} .

La intensidad y duración del déficit hídrico se evaluó a partir de la integral de estrés (S_{Ψ} – Myers, 1988; ecuación 1.2).

3.4.1.3. Fluctuación del diámetro del tronco

FDT se obtuvo mediante sensores LVDT (Solartron Metrology, Bognor Regis, UK, modelo DF $\pm 2,5$ mm, precisión ± 10 μ m), montados en portasensores de aluminio e invar, una aleación compuesta por 64% Fe y 35% Ni de mínima expansión térmica, e instalados en la cara norte del tronco a 40 cm del suelo (Fotografía 3.6). En mandarino, los sensores se conectaron a un datalogger modelo CR10X con multiplexor AM25T y en almendro a un CR23X con multiplexor AM25T (Campbell Scientific Ltd., Logan, USA), ambos programados para almacenar lecturas con una frecuencia de 15 minutos.

A partir de FDT se obtuvieron los siguientes parámetros de acuerdo con Goldhamer y Fereres (2001): máximo (MXTD) y mínimo (MNTD) diámetro diario del tronco, máxima contracción diaria (MCD), calculada como la diferencia entre MXTD y MNTD, y tasa de crecimiento diaria del tronco (TCD), determinada como la diferencia entre MXTD de dos días consecutivos.



Fotografía 3.5. Medida del potencial hídrico foliar y de tallo con cámara de presión.



Fotografía 3.6. Sensor LVDT instalado en tronco de mandarino.

3.4.1.4. Parámetros de intercambio gaseoso

La conductancia estomática (g_s) y fotosíntesis neta (P_n) se midieron en hojas soleadas con un sistema portátil de medida de intercambio gaseoso CIRAS 2® (PP

Systems, Hitchin, Hertfordshire, UK), incorporando un analizador de gas por infrarrojo (IRGA). Se utilizó una cubeta foliar modelo PLC6 (U) (PP Systems, Hitchin, Hertfordshire, UK) con un área de medida de 1,7 cm². La concentración de CO₂ del aire se controló utilizando el sistema de inyección del CIRAS 2® y cilindros de CO₂ comprimido. Los niveles deseados de radiación fotosintética activa (PAR) se obtuvieron actuando sobre una fuente de luz rojo/azul (LED) incorporada en la cubeta foliar (Fotografía 3.7).

3.4.2. Estado nutricional del cultivo

Se tomaron muestras de hojas sanas para evaluar el estado nutricional del cultivo, se secaron durante 48 horas en una estufa de desecación por aire forzado a 65 °C, y se molieron con un molino a 18000 rpm (Mod. A10, IKA® LABORTECHNIK, Alemania).

Para las determinaciones de cationes, se calcinaron las muestras por vía seca, pesando 0,2 g de materia seca en crisoles de cerámica y a continuación se introdujeron en un horno mufla programable. Se disolvieron las cenizas en 5 ml de HNO₃ 0,7 N, se aplicó calor para ayudar a disolver los componentes menos solubles y por último se filtraron y se recogieron en un matraz aforado de 25 ml, a través de un papel de filtro lavado al ácido, enrasando hasta completar los 25 ml con agua osmotizada. La concentración de Na⁺, K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ se determinó utilizando un espectrofotómetro (Induced Coupled Plasma Varian MPX Vista).

Para las determinaciones de cloruros se pesaron 50 mg de materia seca en un recipiente de plástico y se le añadió 10 ml de agua bidestilada. La mezcla se agitó durante 30 minutos y se dejó reposar a temperatura ambiente. A continuación se filtró y del filtrado se tomaron 500 µl, donde se determinó la concentración de cloruro mediante valoración con un electrodo de plata empleando un analizador de cloruros (SHERWOOD MKII Chloride Analyzer 926).

3.4.3. Crecimiento vegetativo

3.4.3.1. *Sección transversal del tronco*

El diámetro del tronco se midió con cinta métrica flexible de $1\text{ m} \pm 1\text{ mm}$ a unos 10 cm por encima de la unión del injerto. Las medidas se realizaron en los mismos puntos marcados desde el inicio del ensayo. La sección transversal del tronco (STT) se obtuvo a partir de la ecuación:

$$STT = \pi * (D/2)^2 \quad (\text{cm}^2) \quad [3.8]$$

siendo D el diámetro del tronco.

3.4.3.2. *Poda*

La madera eliminada de cada árbol se pesó individualmente con una balanza electrónica con capacidad de 150 kg y repetibilidad $\pm 5\text{ g}$ (Scaltec Mod. SSH91).

3.4.4. Floración

En el ensayo del mandarino se controló semanalmente la evolución de las yemas a través de los distintos estados fenológicos. En este estudio los estados fenológicos considerados fueron los 7 estados clasificados por Frost y Soost (1968), como:

- A: yema floral antes de la meiosis.
- B: yema floral en meiosis.
- C: yema floral con granos de polen.
- D: yema floral al fin de desarrollo.
- E: flor en el momento de la polinización.
- F: pistilo después de la caída de pétalos.
- G: ovario después de la abscisión del estilo.

El estado fenológico medio de cada árbol se valoró mediante la siguiente ecuación (García-Lidón, 1992):

$$\Gamma = \frac{(\% A \times 1) + (\% B \times 2) + (\% C \times 3) + (\% D \times 4) + (\% E \times 5) + (\% F \times 6) + (\% G \times 7)}{100} \quad [3.9]$$

Siendo %A, %B, etc. el porcentaje de flores o frutos en los diferentes estados en cada uno de los muestreos. Los estados fenológicos de A a G van multiplicados por un número que va del 1 al 7, ponderando el valor de Γ , de manera que aumenta conforme avanza la floración.

3.4.5. Crecimiento del fruto

La dinámica de crecimiento del fruto se determinó usando un calibre digital (Mitutoyo CD-15D; Fotografía 3.8). Las medidas se realizaron en frutos marcados, colocados en ramas del tercio medio del árbol. A partir de estas medidas se determinó la velocidad de crecimiento relativo (VCR) mediante la expresión proporcionada por Tattini *et al.* (1995):

$$VCR = \frac{\ln \Phi_2 - \ln \Phi_1}{\ln t_2 - \ln t_1} \quad [3.10]$$

donde t es el tiempo transcurrido entre dos mediciones consecutivas y Φ el diámetro, la variable medida.



Fotografía 3.7. Pinza del equipo de medida de parámetros de intercambio gaseoso CIRAS 2® durante una medición



Fotografía 3.8. Medida del diámetro longitudinal del fruto con calibre digital de un fruto marcado.

3.4.6. Producción

La producción se evaluó a partir del peso y número de frutos por árbol. En el ensayo del almendro, se pesó la producción total antes de ser pelada mecánicamente. Se determinó el peso fresco de las fracciones ‘corteza’ y ‘semilla + cáscara’, y se llevó a cabo un proceso de secado natural de ambas fracciones por exposición al sol para la determinación del peso seco. Los pesajes se realizaron con una báscula de 60 kg (Scaltec, Model SSH 92) con precisión de ± 2 g.

3.4.7. Análisis de la calidad de la cosecha de mandarina

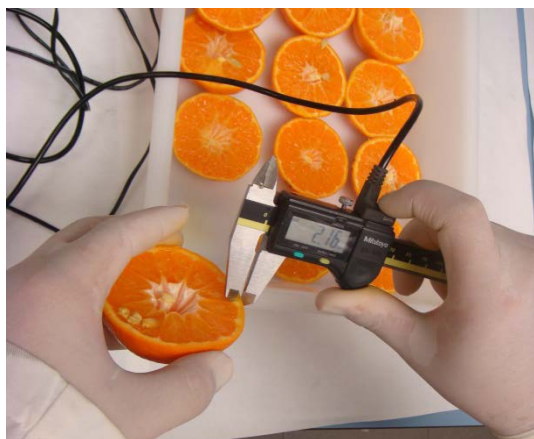
3.4.7.1. *Parámetros físicos*

Peso

Los frutos se pesaron en una balanza de pesos equilibrados, con precisión de $\pm 0,01$ g. El peso medio de cada fruto se obtuvo dividiendo el peso de la muestra por el número de frutos.

Diámetro ecuatorial

El diámetro ecuatorial (Φ) de cada fruto se midió con un calibre digital (Mitutoyo CD-15D; Fotografía 3.9) con precisión de $\pm 0,01$ mm.



Fotografía 3.9. Medida del espesor de corteza con calibre digital.

Espesor de corteza

Sobre una de las dos mitades del fruto y en un punto al azar se midió el espesor de corteza con un calibre digital (Mitutoyo CD-15D; Fotografía 3.9).

Zumo

La extracción de zumo se efectuó manualmente, por medio de un exprimidor (Mod. 4, 220V, Lomi; Fotografía 3.10). El zumo se separó de la pulpa mediante tamizado a través de una muselina de nylon de 1 μm (Fotografía 3.11). De esta forma se obtuvieron dos fracciones de zumo, el denominado filtrado, que es aquel que pasa a través de la muselina por gravedad, y el sifonado, que es el que queda retenido por la pulpa, separado de ésta por presión natural. El volumen total del zumo se obtuvo mediante la suma del volumen filtrado y el sifonado.



Fotografía 3.10. Muestras preparadas para la extracción del zumo con exprimidor (al fondo).



Fotografía 3.11. Detalle de la muselina empleada para separar la pulpa del zumo.

Densidad del zumo

En una probeta con 250 ml de zumo filtrado se introdujo un densímetro marca Protón, con rango 1000-1100 g l^{-1} (Fotografía 3.12). Posteriormente se sumergió durante unos minutos un termómetro para medir la temperatura y expresar los datos corregidos a 15 °C. Obtenida la densidad, el zumo se expresó como porcentaje:

$$Zumo = \frac{V \times d}{P} \times 100 \quad (\%) \quad [3.11]$$

donde V (ml) es el volumen total del zumo, d (g ml⁻¹) la densidad del mismo y P (g) el peso de los frutos exprimidos.

Corteza y pulpa

El peso de la corteza y la pulpa (Fotografía 3.13) se expresó como porcentaje de peso en relación al peso fresco total del fruto:

$$Pulpa = \frac{P_{pulpa}}{P_{fruto}} \times 100 \quad (\%) \quad [3.12]$$

$$Corteza = \frac{P_{corteza}}{P_{fruto}} \times 100 \quad (\%) \quad [3.13]$$



Fotografía 3.12. Densímetro introducido en probeta para la determinación de la densidad del zumo.



Fotografía 3.13. Balanza empleada en el peso de la pulpa y las cortezas de mandarina.

Determinación del color

La medida del color se realizó en frutos intactos y limpios sobre tres puntos equidistantes de la zona ecuatorial, mediante un colorímetro (MINOLTA CR-300; Fotografía 3.14) y se expresó como valores de CIE: L*, a* y b* (Sistema CIELAB de

coordenadas L^* , a^* , b^*). El color queda caracterizado según un sistema tridimensional en el que las tres coordenadas están correlacionadas con tres índices básicos para la apreciación del color: HUE (tono o color base), Value (luminosidad) y CHROMA (saturación de color) (Comisión Internationale de L'Eclairage, 1978).



Fotografía 3.14. Colorímetro usado para la caracterización del color en el ensayo de mandarina.

La luminosidad, L^* , corresponde al color blanco cuando su valor es 100 y al negro cuando es 0. La cromaticidad (tono y croma) se indica por a^* y b^* conjuntamente, a^* representa el eje que va desde colores verdes ($-a^*$) hasta colores rojos ($+a^*$) y b^* representa el eje que evoluciona desde el azul ($-b^*$) hasta el amarillo ($+b^*$).

El índice de color para los cítricos (I_C), en concreto para naranjas y mandarinas, consiste en una medida instrumental, para dar un valor objetivo al color de la epidermis (flavedo) de estos frutos y ha sido desarrollado a través de una combinación de los coeficientes triestímulo L^* , a^* y b^* .

El I_C ha sido definido por Jiménez-Cuesta *et al.* (1981) como:

$$I_C = 1000 \frac{a^*}{L^* \times b^*} \quad [3.14]$$

Para los diferentes estados de coloración de naranjas y mandarinas, el I_C varía aproximadamente entre -20 y +20 aunque en el caso de la mandarina existe una carta de color patentada por el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA) que oscila entre -26 y +29. En ambos casos se recomienda no recolectar hasta que el I_C sea superior a -7.

- $I_C \leq -7$; verde
- $-7 < I_C < 0$; verde amarillento
- $I_C \approx 0$; amarillo pálido o naranja verdoso
- $0 < I_C < 7$; naranja pálido
- $I_C \geq 7$; naranja

3.4.7.2. Parámetros químicos

Sólidos solubles totales

Para estimar el contenido en azúcares de los cítricos se emplea habitualmente el valor de los sólidos solubles totales (SST), ya que del 75 al 85% de los SST del zumo de naranjas, mandarinas, pomelos y limones son azúcares (Agustí, 2003). La relación entre SST y azúcares corresponde a que una solución de sacarosa al 1% y a 20 °C tiene un grado Brix.

En el presente trabajo la determinación de los SST se llevó a cabo en una pequeña porción de zumo mediante un refractómetro digital Atago de lectura automática referida a 20 °C (Fotografía 3.15). El refractómetro mide el índice de refracción, que nos indica la proporción de una luz brillante que se retarda al pasar a través de un líquido (en este caso zumo), y dispone de una escala donde se observa directamente ese índice de refracción, expresado generalmente como °Brix o % SST. En este caso, la concentración en SST del zumo se expresó en °Brix.

Acidez total titulable según el ácido dominante

La acidez total del zumo se expresa como el número de gramos de ácidos contenidos en un litro del mismo. En el zumo de los cítricos el ácido predominante es el ácido cítrico (Agustí, 2003).

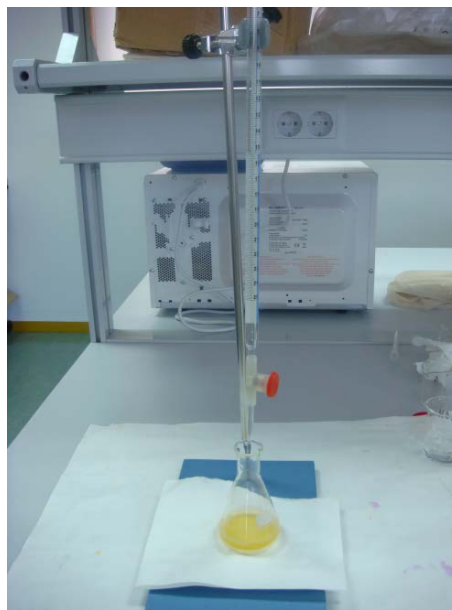
La acidez titulable (AT) se determinó por valoración ácido-base, neutralizando la acidez del zumo filtrado con hidróxido sódico (NaOH) 0,1 N hasta llegar a un pH final de 8,2 (Fotografía 3.16). Se usó fenolftaleína como indicador (2-3 gotas). La AT en función del ácido dominante se calculó a partir de los ml de NaOH consumidos en la valoración, según la ecuación:

$$Acidez = \frac{V \times 0,1 \times 192}{V_1} \quad (\text{g l}^{-1}) \quad [3.15]$$

siendo V el volumen en ml de NaOH 0,1N consumidos en la valoración y V_1 el volumen de zumo empleado en la disolución. Se emplearon 5 ml de zumo.



Fotografía 3.15. Refractómetro digital empleado en la determinación de los SST.



Fotografía 3.16. Bureta con NaOH empleada en la determinación de acidez por volumetría.

Indice de madurez

Se define como la relación entre los sólidos solubles totales (SST) y la acidez titulable (AT):

$$IM = \frac{SST}{AT} \quad [3.16]$$

Este índice es de gran importancia a la hora de definir la madurez y calidad de los frutos puesto que existe un mínimo requerido a los SST y un máximo de acidez para que estos tengan buen sabor.

3.4.8. Análisis de la calidad física de la almendra

Para la determinación de los atributos físicos de la almendra, se tomó una muestra de aproximadamente 500 g de almendra-cáscara de cada uno de los árboles muestreados. A partir de esta muestra se determinó el peso medio del grano y el

rendimiento al descascarado. Además se valoró el porcentaje de almendras pelonas (almendra con corteza adherida a la cáscara), vacías (la semilla no ha acumulado asimilados) y dobles. Así mismo, y con un calibre digital (Mitutoyo CD-15D) se determinaron las dimensiones principales del fruto: longitud (L), diámetro transversal (T) y diámetro ecuatorial (E), en 25 almendras por muestra, tanto a nivel de almendra-cáscara como de pepita. Estas dimensiones permitieron la determinación de los siguientes índices de forma (Mohsenin, 1970; Egea *et al.*, 1985):

$$I1 = \frac{E}{L} \times 100 \quad [3.17]$$

$$I2 = \frac{T}{L} \times 100 \quad [3.18]$$

$$Esfericidad(\theta) = \frac{(L \times E \times T)^{\frac{1}{3}}}{L} \times 100 \quad [3.19]$$

3.4.9. Conservación de frutos de mandarino

Las mandarinas se conservaron en celdas herméticas de acero inoxidable de 360 l de capacidad que fueron conectadas a barboteadores con compresor de aire de membrana de 250 l h⁻¹ (Schego Optimal, Germany). T y HR fueron registradas de forma continua (Hobo Pro H08-032-08, Onset Comp. Corp. USA).



Fotografía 3.17. Mandarinas conservadas en celdas herméticas dentro de la cámara.

4. Respuesta agronómica y fisiológica del mandarino sometido a riego deficitario controlado con agua salina

4.1. Introducción

La gestión de los recursos hídricos en la agricultura se hace más complicada con el paso de los años, al ser éstos cada vez de menor calidad y más escasos y tener que competir por su uso con el resto de sectores productivos. Por ello la agricultura necesita desarrollar estrategias de riego que permitan maximizar la eficiencia del agua, manteniendo, en la medida de lo posible, unos niveles aceptables de producción y calidad de la cosecha. Además podría ocurrir, tal y como sucede en el sureste español, que la utilización de agua de baja calidad se convierta en una opción necesaria, y que incluso con su uso no se disponga de agua suficiente para cubrir las necesidades hídricas del cultivo. Bajo este escenario, sería de gran interés conocer la respuesta de cultivos tan relevantes como los cítricos al estrés combinado por sequía y salinidad.

El riego deficitario controlado (RDC) se ha consolidado como una estrategia que propicia el ahorro de agua. Ésta se basa en reducir los aportes hídricos en aquellos periodos fenológicos en los que un déficit no afecte a la producción ni a la calidad, cubriendo las necesidades hídricas de la planta durante el resto del ciclo de cultivo (Chalmers *et al.*, 1981; Mitchel y Chalmers, 1982; Domingo *et al.*, 1996). Para su aplicación es necesario conocer el período fenológico más adecuado, su duración e intensidad. En la revisión realizada por Ruiz-Sánchez *et al.* (2010) se recogen numerosos estudios basados en la respuesta de los cítricos al RDC. En la generalidad de ellos, se evita aplicar un déficit hídrico durante la floración-fructificación, al considerarle un período crítico donde el estrés puede promover una caída de frutos y, en consecuencia, un descenso de la cosecha. Así, se recomienda aplicarlo durante la primavera en naranjos ‘Salustiana’ (Castel y Buj, 1993) o en el verano en ‘Clementinas’ y ‘Navelina’ (Ginestar y Castel, 1996a; González-Altozano y Castel, 1999, 2000a,b; Ballester *et al.*, 2008, 2009; Gasque *et al.*, 2009), pero en cambio, lo hacen sin concretar referencias fisiológicas que delimiten la duración del periodo de riego deficitario y que avalen su aplicación, al existir el riesgo de disminuir el tamaño final del fruto al aplicar un déficit hídrico durante la fase II del crecimiento del fruto.

RDC, además de lograr un cierto ahorro de agua, puede mejorar la calidad de los frutos al incrementar los sólidos solubles totales y acidez titulable del zumo (González-Altozano y Castel, 2003a; Pérez-Pérez *et al.*, 2009). Sin embargo, se desconoce el efecto del RDC en la conservación posterior a la cosecha. Estos estudios se han llevado a cabo en manzana (Mpelasoka y Behboudian, 2002) o frutos de hueso (Gelly *et al.*, 2003; Pérez-Pastor *et al.*, 2007) pero son escasas las referencias bibliográficas en este sentido en cítricos.

El objetivo de este trabajo fue caracterizar durante tres campañas (2005-06, 2006-07 y 2007-08) la respuesta fisiológica y agronómica del mandarino tardío cv. Fortune al RDC con agua de elevada salinidad y su posterior recuperación (2008-09). El objetivo final es poder utilizar la información suministrada por los distintos indicadores del estado hídrico de la planta en la optimización del manejo del riego en RDC con aguas salinas.

4.2. Material y métodos

Condiciones experimentales

El ensayo se desarrolló en una finca comercial ubicada en Miranda (Cartagena, 37° 40' N, 1° 0,2' O, 62 m de altitud, Fotografía 4.1) con mandarinos adultos cv. Fortune (Clementina x mandarina Dancy (*Citrus clementina* Hort. Ex. Tanaka x *Citrus reticulata* Blanco)) injertados sobre mandarino cv. Cleopatra (*Citrus reshni* Hort. ex. Tanaka). Los árboles de 15 años de edad al inicio del ensayo, están dispuestos a un marco de plantación de 5 m x 3 m y se regaron a partir de un sistema de riego localizado con dos líneas portaemisores por fila de árboles y 6 goteros por árbol de 4 l h⁻¹. El clima fue típicamente mediterráneo con una evapotranspiración de referencia, ETo (Allen *et al.*, 1998) y lluvia media anual de 1435 mm y 293 mm, respectivamente. El verano fue muy seco y caluroso, coincidió con la fase II, denominada de rápido crecimiento del fruto. El suelo se caracterizó por ser muy pedregoso, de textura franco-arcillosa, con un nivel medio de materia orgánica (2,05%) y alto en caliza y potasio (12,81% y 1,28 meq 100g⁻¹, respectivamente). El agua de riego procedía de una mezcla de agua del trasvase Tajo-Segura y de pozo, cuya conductividad eléctrica (CE_{25°C}) mantuvo valores en torno a 1,35 dS m⁻¹ durante el primer año, y ligeramente superiores a 4 dS m⁻¹ a partir del segundo año

alcanzándose niveles elevados de sodio y cloruro (29,59 y 29 meq l⁻¹, respectivamente). Las dosis de riego se determinaron semanalmente a partir de la ETo, coeficientes de cultivo (Kc) (Doorenbos y Pruitt, 1977), factor de corrección (Kr) en función del área sombreada por el cultivo (Fereres *et al.*, 1981) y la estima de los requerimientos de lavado (RL) (Maas y Hoffman, 1977).



Fotografía 4.1. Vista aérea de la finca comercial donde se desarrolló el experimento, delimitada por un rectángulo amarillo.

Tratamientos

Se ensayaron 4 tratamientos de riego distribuidos en un diseño de bloques al azar con 4 repeticiones por tratamiento. Cada repetición estaba formada por tres filas de 7 árboles cada una, tomando como árboles testigo los 5 centrales y dejando el resto como bordes. Para la programación del riego deficitario controlado, los períodos críticos considerados fueron la floración-fructificación y el período desde la ralentización del crecimiento del tronco hasta la finalización de la fase II del crecimiento del fruto, este periodo se fue ajustando con el avance del estudio. Los tratamientos ensayados fueron:

- i) Control (CTL), regado al 100% de la ETc el primer año y con unos requerimientos de lavado del 33% adicional el segundo y tercer año
- ii) RDC, regado como CTL excepto en la fase I y principio de la II (inicio de la ralentización de crecimiento del tronco) donde se regó al 65 y al 50% de CTL en la primera (2005/06) y las dos últimas campañas (2006-08), respectivamente, y al 80% en la fase III

- iii) RDC₅₀, ensayado a partir del segundo año, regado al 50% de RDC durante el periodo de déficit
- iv) FINCA, programado por el agricultor, quien aplicó reducciones con respecto a CTL en torno al 50% durante las fases I y II del crecimiento del fruto y por encima de los niveles del CTL (170-200% CTL) desde finales de la fase II hasta el final de la campaña

Medidas

Los datos meteorológicos se obtuvieron de la estación climática ‘La Aljorra’ (Apartado 3.2). El potencial matricial del agua en el suelo (Ψ_m) se midió semanalmente a partir de dos tensiómetros por repetición: uno a 30 cm y otro a 70 cm de profundidad. El contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v) fue medido cada 10 cm hasta 90 cm de profundidad con una sonda capacitiva portátil (Diviner 2000®, Sentek Pty. Ltd.) en un tubo de acceso por repetición, instalado en la zona de humectación del gotero bajo la copa. La solución del suelo, próxima a la proyección del emisor (≈ 25 cm de distancia y a 30 cm de profundidad) se extrajo con una sonda de succión por repetición (4 por tratamiento) tras advertir el incremento de salinidad en el agua de riego. Se analizaron muestras de suelo a diferente profundidad, en días en los que se venía regando con agua de diferente calidad (3 y 20 de febrero de 2006, con $CE_{25^\circ C} > 4 \text{ dS m}^{-1}$ y $1,4 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente).

El potencial hídrico de tallo (Ψ_t) se midió cada 7-10 días a mediodía solar con cámara de presión en dos hojas por repetición (8 por tratamiento), próximas al tronco y situadas en la parte sombreada, en los árboles equipados con sensor LVDT. El cálculo de la integral de estrés (S_Ψ) se realizó a partir de los valores de Ψ_t . Durante la campaña 2006-07 se realizaron medidas de potencial hídrico foliar a mediodía (Ψ) y sus componentes siguiendo el mismo criterio que en Ψ_t . Para las medidas de potencial osmótico actual (Ψ_o) y saturado (Ψ_o^{100}) se tomaron tres hojas por repetición.

La conductancia estomática (g_s) y fotosíntesis neta (P_n) se midieron a un $PAR > 1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, por encima de la intensidad de luz de saturación para la fotosíntesis en cítricos (Sinclair y Allen, 1982; Syvertsen, 1984) y a una concentración de CO_2 igual a $350 \pm 5 \mu\text{mol mol}^{-1}$. Estas medidas se realizaron entre las 8:00 y las 10:00 hora solar, en 8 hojas soleadas por tratamiento con la misma frecuencia que las medidas de Ψ_t . La fluctuación del diámetro del tronco (FDT) fue monitorizada en dos árboles por repetición (8 árboles por tratamiento), a partir de sensores LVDT instalados en el tronco (Apartado 3.4).

Se estudió el estado nutricional del cultivo a partir del análisis de 100 hojas por repetición recogidas en noviembre, según lo descrito en el apartado 3.4.2.

El crecimiento vegetativo se evaluó al final de la estación de crecimiento en 5 árboles por repetición (20 árboles por tratamiento), a partir del diámetro de tronco y el peso de la madera de poda. Se obtuvo la sección transversal del tronco (STT) a partir de las medidas de diámetro. Las labores de poda fueron realizadas en los momentos marcados por el agricultor, en septiembre-octubre los dos primeros años y a mediados de julio el tercer año. La floración y fructificación se determinó a partir del conteo de yemas, flores y frutos realizados en dos ramas por árbol y dos árboles por repetición (8 árboles por tratamiento). Las fechas de máxima floración en cada uno de los años se presentan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Fechas de máxima floración y de la recolección durante el período experimental.

Año	Máxima floración	Recolección
2005-06	4 mayo	29 marzo 2006
2006-07	20 abril	23 marzo 2007
2007-08	20 abril	10 abril 2008

El crecimiento del fruto se determinó semanalmente desde el cuajado hasta la recolección en 5 frutos marcados por árbol, en los 20 árboles testigo de cada tratamiento. A partir de éstas se calculó la velocidad de crecimiento relativo (VCR; Tattini *et al.*, 1995).

La producción fue determinada anualmente en 5 árboles por repetición. La cosecha de 2005 sirvió como punto de partida para el estudio y la de 2009 para evaluar la capacidad de recuperación de los árboles tras un año regando todos los

tratamientos como CTL. Las características físicas y químicas evaluadas en los frutos recolectados fueron el diámetro ecuatorial (Φ), índice de color externo (I_c), espesor de corteza, porcentajes de zumo, pulpa y corteza, contenido en sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (AT) e índice de madurez (IM). Los análisis se realizaron a partir de 45 frutos por repetición (180 frutos por tratamiento). Durante la recolección se evaluó la presencia de la denominada ‘mancha marrón’ producida por el hongo *Alternaria* sp., a partir de valoración visual (presencia o ausencia de manchas) de los frutos de un árbol por bloque, seleccionado previamente al azar.

Los frutos correspondientes a la campaña 2006-07, recolectados el 13 de marzo de 2007, se almacenaron a 5 °C y 95% de HR durante 50 días en dos cámaras herméticas de 360 l con flujo de aire humidificado continuo (250 l h⁻¹). Tras este periodo los frutos se pasaron a condiciones de comercialización, a 20°C durante 8 días. La calidad fue determinada en 4 repeticiones de 45 frutos cada una en la cosecha y al final de la conservación (50d a 5°C + 8d a 20°C). Se monitorizó semanalmente la pérdida de peso durante el almacenamiento en base a peso fresco durante la conservación frigorífica y diariamente durante el periodo de comercialización en submuestras de 3 frutos por repetición (n=4). Los frutos fueron pesados individualmente.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a análisis de la varianza (ANOVA), de pruebas de comparación múltiples a un nivel de confianza del 95%, usando el test de Duncan con el paquete estadístico SPSS v. 15 para Windows (SPSS Inc., Chicago, USA). Las correlaciones entre variables se sometieron a análisis de regresión. El coeficiente de determinación (r^2) se usó para evaluar la bondad del ajuste entre variables.

4.3. Resultados y discusión

4.3.1. Agua aplicada

Durante las tres campañas de estudio la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia (ET_o) promedió 1435 mm, alcanzando valores máximos en verano (7,32, 7,55, 8,55 mm día⁻¹) y mínimos en invierno (0,64, 0,63 y 0,47 mm día⁻¹

en 2005-06, 2006-07 y 2007-08, respectivamente). El volumen de agua procedente de la lluvia fue muy similar en cada uno de los 3 años estudiados, alcanzándose una media de 293 mm, aunque el último año disminuyó ligeramente (Tabla 4.2).

El volumen de agua aplicado en CTL se incrementó un 26% a partir del segundo año debido al aumento de la salinidad del agua de riego, en concepto de requerimientos de lavado (Tabla 4.2). A pesar de ello, en los dos últimos años se incrementó la restricción hídrica en los tratamientos deficitarios, cifrándose en torno a un 40% en RDC y FINCA, y en un 63% en RDC₅₀ (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Climatología, riego en CTL y porcentaje de ahorro de agua en los tratamientos deficitarios.

mm	2005-06	2006-07	2007-08	Media
ET_o	1444	1441	1419	1435
Lluvia	295	320	264	293
Riego (CTL)	651	821	828	767
% de reducción respecto a CTL				
RDC	8	36	43	29
RDC₅₀	-	58	68	63
FINCA	-5	32	48	25

4.3.2. Estado hídrico del suelo

En la figura 4.1 se muestra el comportamiento que presentó Ψ_m en los tratamientos CTL y RDC durante el ciclo de crecimiento 2005-06. En las dos primeras campañas CTL mostró valores en torno a -12 cbar durante las tres fases de crecimiento del fruto, y ligeramente inferiores en la tercera (-16 cbar en las fases II y III), denotándose condiciones no limitantes de agua en el suelo para el cultivo. Los valores en RDC coincidieron con los de CTL cuando el riego fue similar y la demanda evaporativa baja, aunque se regara en menor cantidad que aquél en esos momentos (meses de otoño e invierno), e inferiores al final de la fase I y principio de la II, llegándose a alcanzar valores fuera de rango (Figura 4.1).

Los valores de humedad volumétrica del suelo mostraron diferencias entre CTL y RDC inmediatamente después de iniciarse el déficit hídrico en éste último tratamiento (Figura 4.2), manteniéndose éstas durante el período de déficit en los

primeros 30 cm de profundidad, y durante más tiempo a mayor profundidad (Figura 4.2), a pesar de restaurar el riego a niveles del control.

Pérez-Pérez (2005) observó una recuperación en el contenido volumétrico de agua en el suelo a los niveles del control tras 7 días de reanudación del riego después de haber sometido naranjos Lane late injertados sobre Cleopatra a supresión del riego durante la fase I.

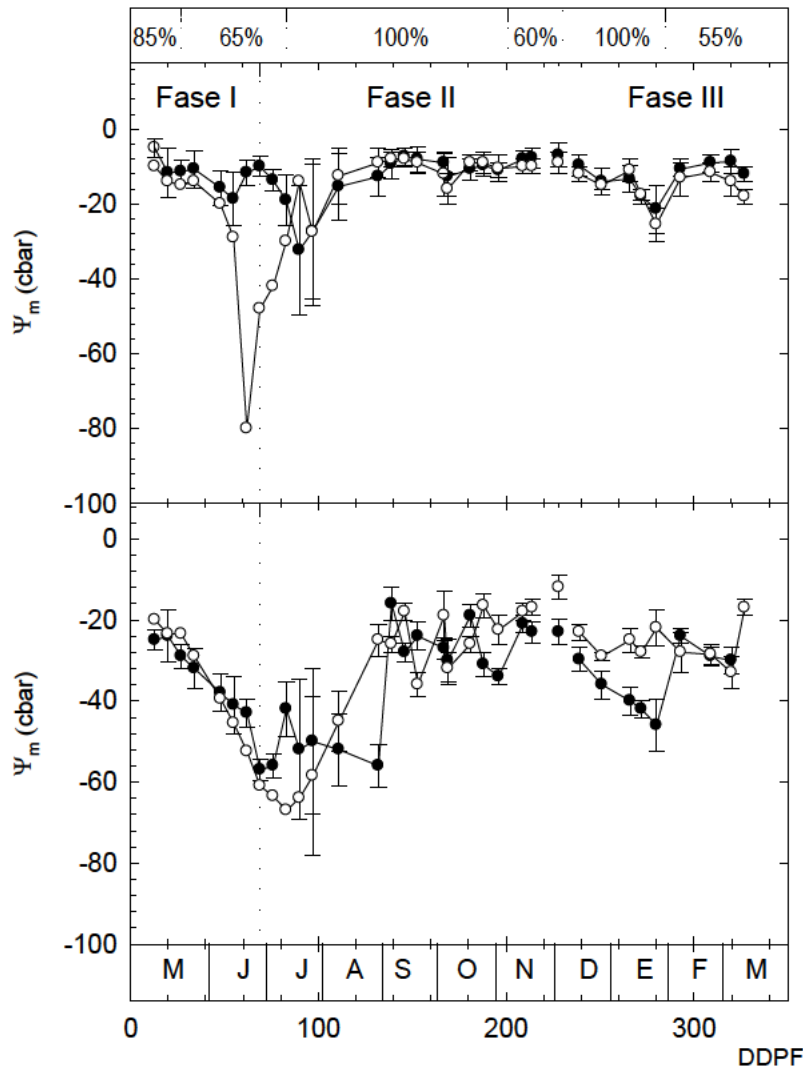


Figura 4.1. Potencial matricial del agua en el suelo (Ψ_m) a 30 (arriba) y 70 cm (abajo) de profundidad de los tratamientos CTL (\bullet) y RDC (\circ) durante la campaña 2005-06. La barra superior indica los aportes de riego (%) al tratamiento deficitario respecto a CTL.

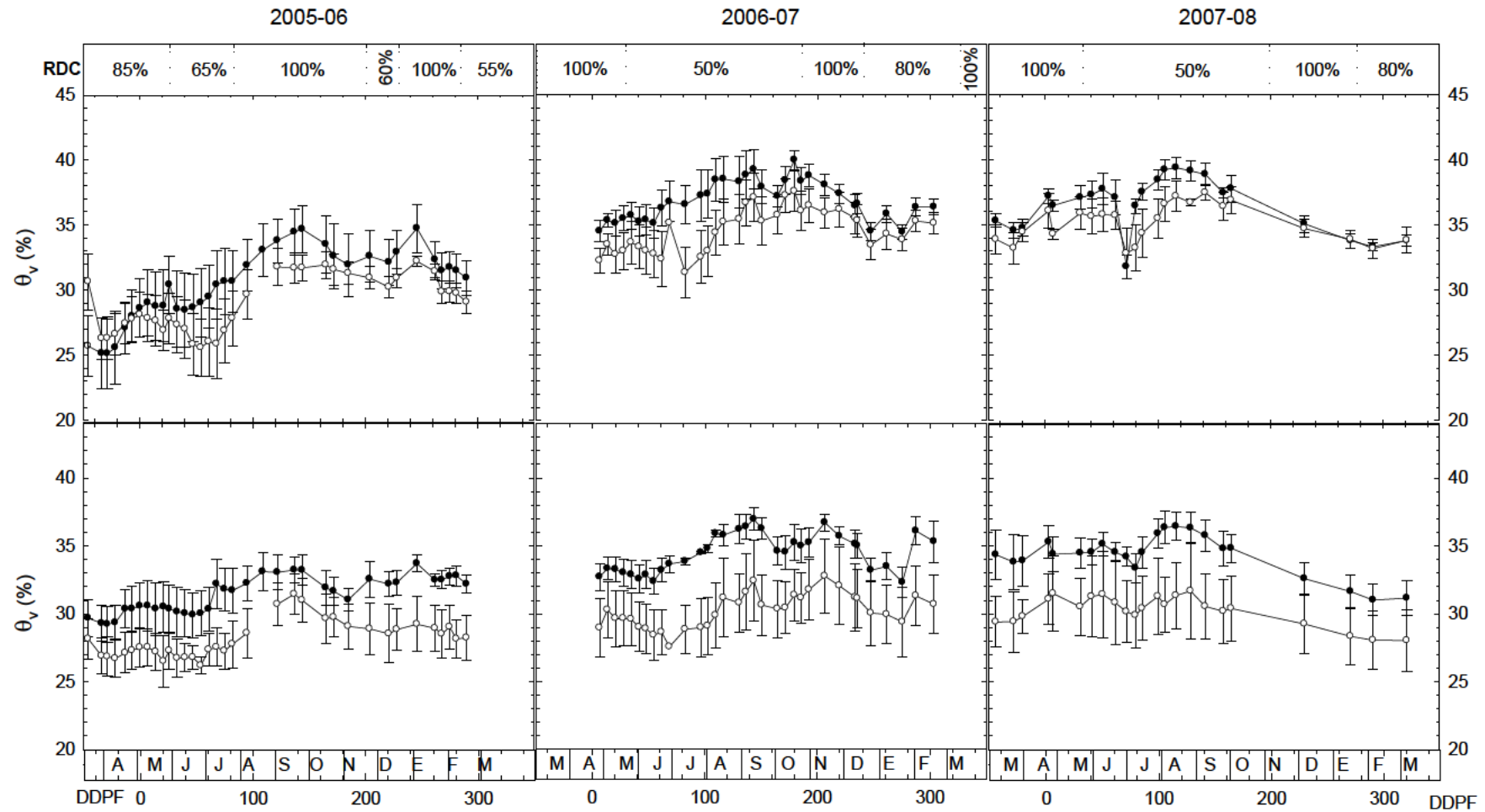


Figura 4.2. Contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v), en los perfiles 0-60 (arriba) y 60-90 (abajo) de los tratamientos CTL (●) y RDC (○) durante las tres campañas ensayadas. La barra superior indica los aportes de riego al tratamiento deficitario (%) respecto a CTL. DDPF: Días desde plena floración.

La salinidad alcanzada en la zona radicular, determinada a partir de pastas saturadas, alcanzó el 3 de febrero de 2006 valores inferiores a 3 dS m^{-1} en los primeros 30 cm de profundidad y ligeramente superiores a 60 cm para los tres tratamientos de riego ensayados (CTL, RDC y FINCA; Figura 4.3). FINCA presentó los valores más bajos en el horizonte superior, debido a que se regaba más que el resto de tratamientos (Figura 4.4). Posteriormente, los niveles se redujeron por debajo de $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ (Figura 4.3), debido a la reducción de la salinidad del agua de riego y de la lluvia ocurrida los días previos.

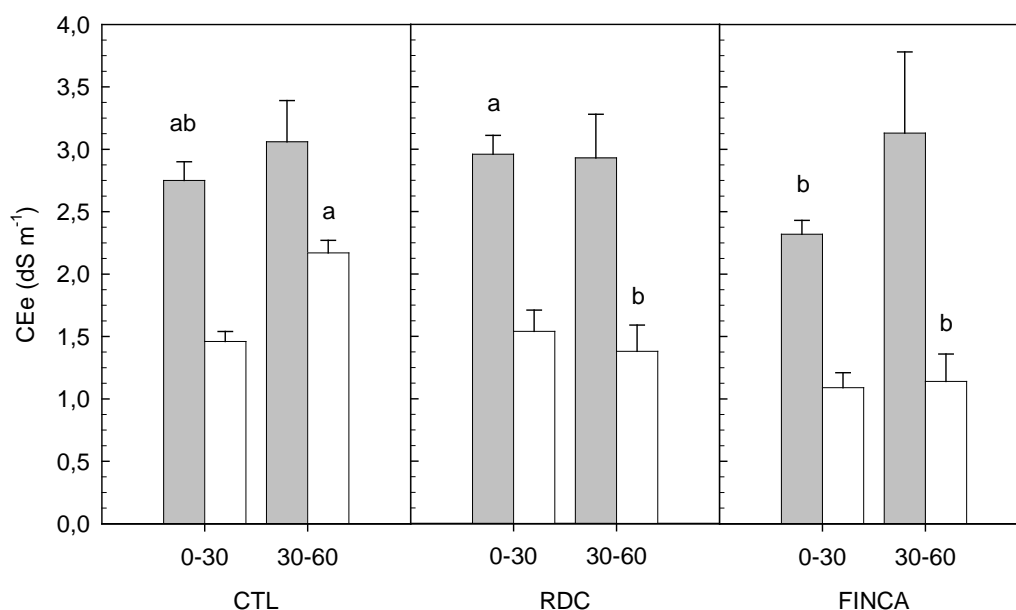


Figura 4.3. Valores de la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (CEe , dS m^{-1}) procedentes de muestras tomadas en la zona del bulbo húmedo el 3 de febrero (tras regar con agua salina, ■) y el 20 de febrero de 2006 (tras regar con agua de buena calidad, □). Las letras indican diferencias entre tratamientos para la misma posición de muestreo y para el mismo día, y la ausencia de letras muestra ausencia de diferencias.

En el último ciclo de crecimiento (2007-08), el agua de riego mantuvo una conductividad eléctrica constante en torno a 4 dS m^{-1} (Figura 4.4), incrementando la salinidad del suelo de forma considerable. En la tabla 4.3 se muestran, para este último ciclo, los niveles medios de salinidad de la solución extraída del suelo a 30 cm de profundidad para cada una de las fases de crecimiento del fruto. CTL y RDC mostraron valores similares entre sí, superiores a 5 dS m^{-1} e intermedios a los mostrados por FINCA y RDC_{50} . Estos últimos alcanzaron los valores más bajos y elevados, respectivamente, debido a la distinta cantidad de agua de riego recibida en

esos momentos (Figura 4.4). Estos valores de salinidad ocasionarían, de acuerdo a Maas y Hoffmann (1977), una reducción de la producción superior al 50%.

Tabla 4.3. Valores medios de conductividad eléctrica del agua de riego y de la solución del suelo (CEss) a 30 cm de profundidad correspondientes a la campaña 2007-08 por fases de crecimiento del fruto.

	Fase I	Fase II	Fase III
Agua de riego	4,46	3,92	4,00
CEss			
CTL	6,11 a	5,19 ab	5,66 b
RDC	5,93 ab	5,31 ab	5,42 b
RDC₅₀	5,63 b	5,50 a	7,33 a
FINCA	4,71 c	4,82 b	4,12 b

Las letras indican diferencias entre tratamientos en CEss según el test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$).

4.3.3. Estado hídrico de la planta

Potencial hídrico

La figura 4.4 (d-f) recoge la evolución del potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) durante el período experimental. Los valores medios, exceptuando los registrados en los meses de invierno, fueron en torno a -1,1 MPa para CTL (oscilando entre -0,6 MPa en primavera y -1,2 MPa en verano). Estos niveles fueron similares o superiores a los registrados en árboles control por Ortuño *et al.* (2006a), Vélez *et al.* (2007) y Pérez-Pérez *et al.* (2008a) en cítricos, los que en conjunción con Ψ_m (Figura 4.1) sugieren condiciones hídricas no limitantes para el cultivo.

Durante el periodo experimental, Ψ_t resultó sensible al déficit hídrico. Su comportamiento en los tratamientos deficitarios dependió de la duración e intensidad del déficit aplicado y en todos los casos la respuesta al déficit y a la recuperación fue muy rápida (Figura 4.4d-f) coincidiendo con lo observado por Fereres *et al.* (1979), Ruiz-Sánchez *et al.* (1997) y Pérez-Pérez *et al.* (2008a). Los valores de Ψ_t de los tratamientos deficitarios mostraron diferencias con los de CTL al comenzar el déficit en la fase I del crecimiento del fruto, como consecuencia de la reducción del riego y de la elevada demanda evaporativa (Figura 4.4a-c), diferencias que se incrementaron paulatinamente con el avance de la estación y aumento de la

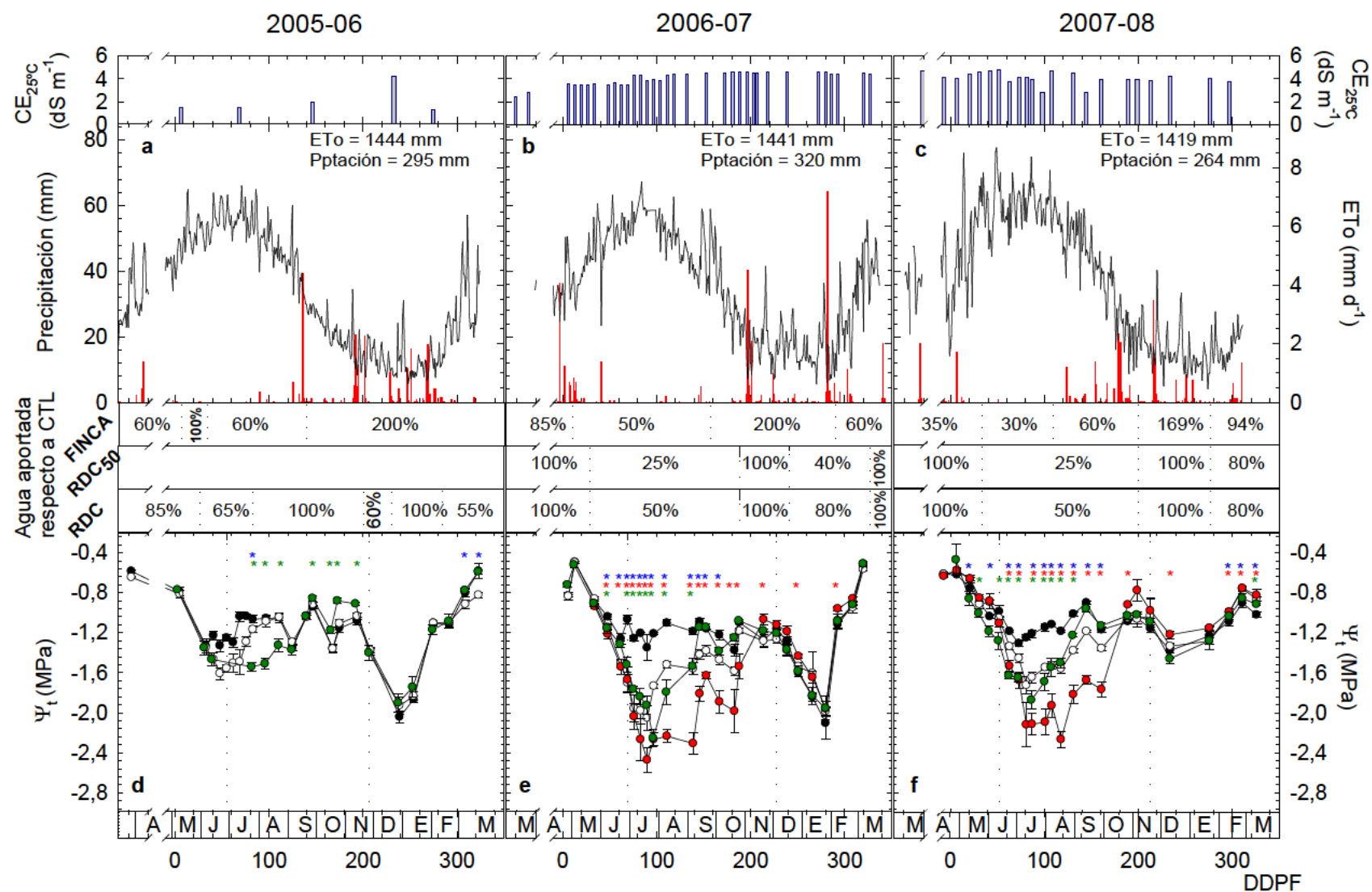


Figura 4.4. Evolución de la ETo Penman-Monteith y precipitación durante las tres campañas que duró el experimento (a, b, c); evolución estacional del potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) de los tratamientos de riego (CTL—●—; RDC—○—; RDC₅₀—●—; FINCA—●—). Cada punto corresponde a la media de 4 repeticiones (d, e, f). Los asteriscos indican diferencias de los tratamientos RDC (*) RDC₅₀ (*) y FINCA (*) respecto a CTL según test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0.05$). Las líneas verticales marcan la separación entre fases fenológicas según el crecimiento del fruto.

demanda. En 2005, las máximas diferencias de Ψ_t alcanzadas en RDC y FINCA respecto a CTL tuvieron lugar a mediados de julio siendo de 0,45 y 0,7 MPa, respectivamente, y coincidiendo con reducciones de agua de riego entre el 30-40%. Los niveles mínimos de Ψ_t se alcanzaron al inicio de la fase II (-1,61 MPa) y se mantuvieron prácticamente constantes durante tres semanas en RDC y dos meses en FINCA.

A partir del segundo año, el incremento del déficit en RDC y el inicio de la aplicación de RDC₅₀, regado al 50% de RDC durante el período de déficit, indujo valores más bajos de Ψ_t y mayores diferencias entre tratamientos. Así RDC y FINCA alcanzaron valores mínimos muy similares en torno a -2,1 y -1,8 MPa en 2006 y 2007, respectivamente. Estos valores se plasmaron en unas diferencias respecto a CTL de 0,9 y 0,4 MPa en 2006 y 2007, respectivamente. RDC₅₀ registró los menores valores de Ψ_t , -2,4 y -2,2 MPa en los dos últimos años, y unas diferencias con CTL de 1,1 MPa.

A pesar de haber aplicado a los tratamientos deficitarios un déficit hídrico similar el tercer año, se alcanzaron valores mínimos de Ψ_t superiores a los del año anterior debido principalmente a que la carga productiva de estos árboles fue muy inferior (Tabla 4.7), provocado por el incremento de la salinidad del agua de riego.

Durante la fase III del crecimiento del fruto se observó una disminución de Ψ_t en todos los tratamientos de riego ensayados, llegándose a alcanzar valores en torno a -2 MPa (Figura 4.4 y 4.5). Esta fase se caracterizó por una baja demanda evaporativa y un elevado volumen de lluvias, que además de cubrir plenamente las necesidades hídricas del cultivo, lixivió rápidamente las sales acumuladas en el suelo (Figura 4.3), debido a la alta permeabilidad del mismo. Por ello, a pesar de la alta sensibilidad de los cítricos a la salinidad, es difícil de explicar esta caída de Ψ_t , aunque Domingo *et al.*, (1996) observaron una disminución similar del potencial hídrico foliar durante el invierno en limonero. Por lo que este hecho podría atribuirse a las bajas temperaturas alcanzadas en el suelo en invierno, tal y como puede observarse en la figura 4.5, que incrementan la resistencia de las raíces a la absorción de agua (Elfving *et al.*, 1972; Terradas y Savé, 1992), y cuyo efecto se

agravaría por la carga productiva del árbol (los valores más bajos se alcanzaron con cargas productivas mayores, es decir, durante el primer y segundo año) (Figura 4.5). Pavel y Fereres (1998) observaron una disminución del potencial hídrico foliar y de tallo y un aumento de la resistencia hidráulica de la raíz en olivos cv. Picual cuando los árboles fueron expuestos a temperaturas de suelo por debajo de 10 °C durante el día y la noche.

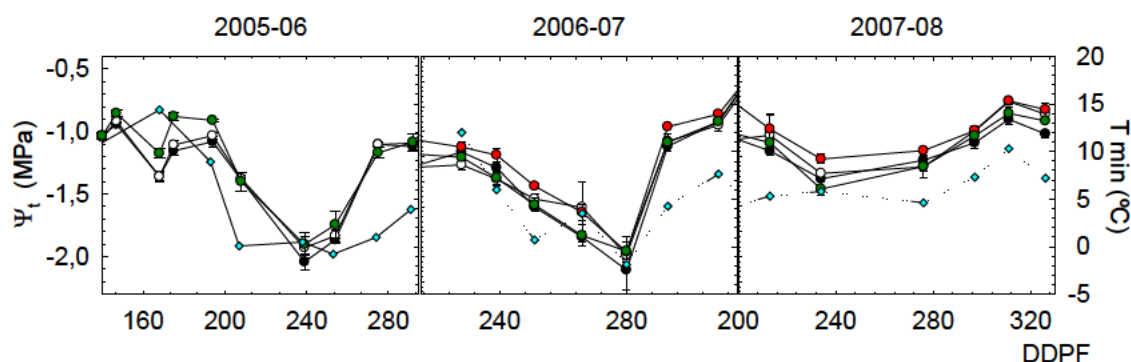


Figura 4.5. Evolución estacional del potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) de los diferentes tratamientos de riego (CTL-●; RDC-○; RDC₅₀-●; FINCA -●) y la temperatura mínima (◆). Cada punto corresponde a la media de 4 repeticiones.

El cálculo de la integral de estrés hídrico (S_Ψ ; Myers, 1988) permitió ver la intensidad del estrés soportado por los tratamientos deficitarios en cada año de ensayo (Tabla 4.4). RDC₅₀ mostró los valores más altos al ser el tratamiento sometido al mayor déficit hídrico, lo que coincide con la evolución de Ψ_t comentada anteriormente. En cuanto a los otros tratamientos, el valor de S_Ψ de FINCA en la primera campaña fue mayor al de RDC dada la mayor duración del déficit aplicado (Figura 4.4), ocurriendo lo contrario en la segunda campaña.

Tabla 4.4. Integral de estrés hídrico (S_Ψ) para los diferentes tratamientos de riego. S_Ψ ha sido determinada a partir de las medidas de Ψ_t .

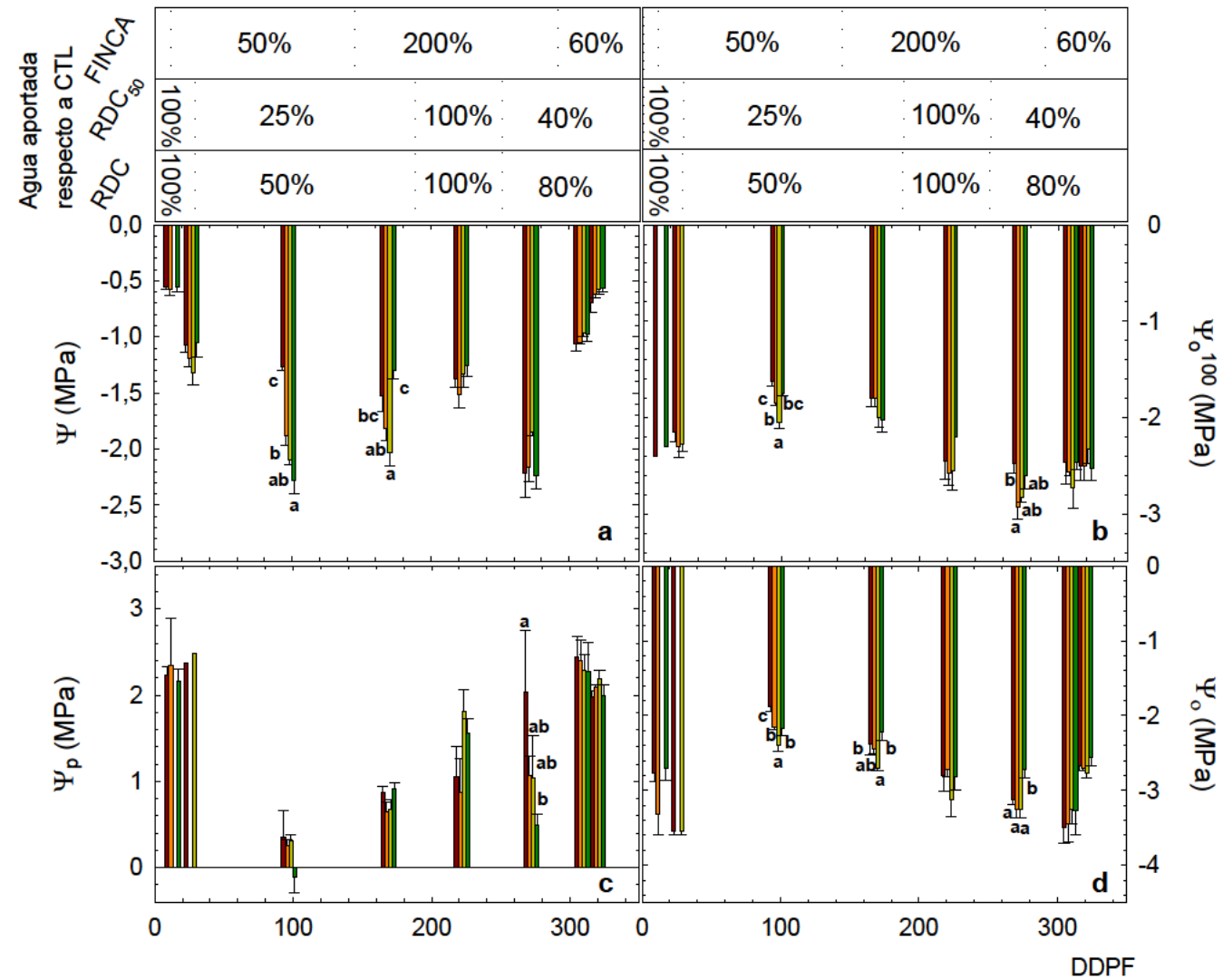
Tratamiento	S_Ψ (MPa día)		
	2005-06	2006-07	2007-08
RDC	13,34	55,15	30,89
RDC ₅₀	-	115,68	71,62
FINCA	19,38	47,79	33,67

La figura 4.6 muestra los valores del potencial hídrico foliar a mediodía (Ψ), potencial osmótico actual (Ψ_o), potencial de presión (Ψ_p) y potencial osmótico saturado (Ψ_o^{100}), obtenidos durante la segunda campaña. Ψ presentó una tendencia similar a Ψ_t (Figura 4.4e), disminuyendo en los tratamientos deficitarios respecto a CTL durante la aplicación de déficit y recuperándose rápidamente cuando el riego se restituyó a niveles de CTL (Figura 4.6). No se observaron diferencias significativas entre los tratamientos de riego en los valores de Ψ_o^{100} , excepto en la medida realizada el día 97 DDPF, en que RDC₅₀ alcanzó con CTL una diferencia de 0,5 MPa, y la del día 272 DDPF, en que se observaron diferencias entre RDC y CTL de 0,45 MPa. El día 97 DDPF el estrés hídrico alcanzado en los tratamientos deficitarios, con valores inferiores a -1,9 MPa de Ψ promovió el desarrollo de mecanismos de ajuste osmótico. Además, se observa una disminución a lo largo del año de los niveles de Ψ_o^{100} , que puede ser adscrita a la acumulación activa de solutos con la edad de la hoja, característica de frutales (Lakso *et al.*, 1984; Yoon y Richter, 1990).

Domingo *et al.* (1996) y Ruiz-Sánchez *et al.* (1997) afirman que los cítricos no desarrollan mecanismos de ajuste osmótico en respuesta al déficit hídrico, lo cual es corroborado por Pérez-Pérez (2005), quien en un ensayo realizado en naranjo concluye que sólo en condiciones de salinidad se observa ajuste osmótico y que el desarrollo de estrés hídrico en condiciones salinas produce un mejor estado hídrico que en condiciones no salinas, manteniendo valores de potencial hídrico más elevados, como consecuencia de una mayor acumulación de iones Na^+ y Cl^- , tanto en la parte aérea como en la raíz.

En este sentido, Gómez-Cadenas *et al.* (1996) afirman que los cítricos son muy sensibles a alteraciones osmóticas producidas por déficit hídrico, mientras que Bañuls y Primo-Millo (1992) y Maas (1993) hablan de la rápida capacidad de ajustar osmóticamente y con alta eficiencia bajo condiciones salinas en determinadas especies de cítricos. Gómez-Cadenas *et al.* (1998) observaron ajuste osmótico en plántulas de citrange Carrizo creciendo en 200 mM NaCl tras al menos 24 h después de aplicar el tratamiento.

Figura 4.6. Evolución del potencial hídrico foliar (Ψ) y sus componentes, potencial osmótico (Ψ_o) potencial de presión (Ψ_p) y potencial osmótico saturado (Ψ_o^{100}) de los diferentes tratamientos de riego (CTL ■; RDC ■; RDC₅₀ ■; FINCA ■) durante la campaña 2006-07. Cada punto corresponde a la media de 4 repeticiones. Las letras indican diferencias entre tratamientos según el test de Rango Múltiple de Duncan ($P<0,05$). Las barras superiores indican los aportes de agua en relación al control en cada uno de los tratamientos estudiados.



El déficit hídrico alcanzado no generó situaciones de pérdida de turgencia foliar en ningún tratamiento durante el periodo experimental, sólo cabe destacar la disminución significativa de los niveles del potencial de presión (Ψ_p) en el tratamiento FINCA, en las medidas realizadas en invierno del año 2007 (Figura 4.6), lo que indica que Ψ_o no disminuyó lo suficiente para permitir mantener la turgencia foliar en los niveles CTL, reflejándose una disminución de Ψ_p por efecto del estrés acumulado (Figura 4.6).

La mayoría de estudios han demostrado que el potencial de presión en hojas de cítricos sometidos a salinización en la zona radicular se mantuvo a niveles similares a plantas no salinizadas y que la acumulación de Na^+ y Cl^- contribuyeron al proceso de ajuste osmótico (Walker *et al.*, 1983; Behboudian *et al.*, 1986; Lloyd *et al.*, 1987a, b, 1989, 1990; Bañuls y Primo-Millo, 1992; Walker *et al.*, 1993).

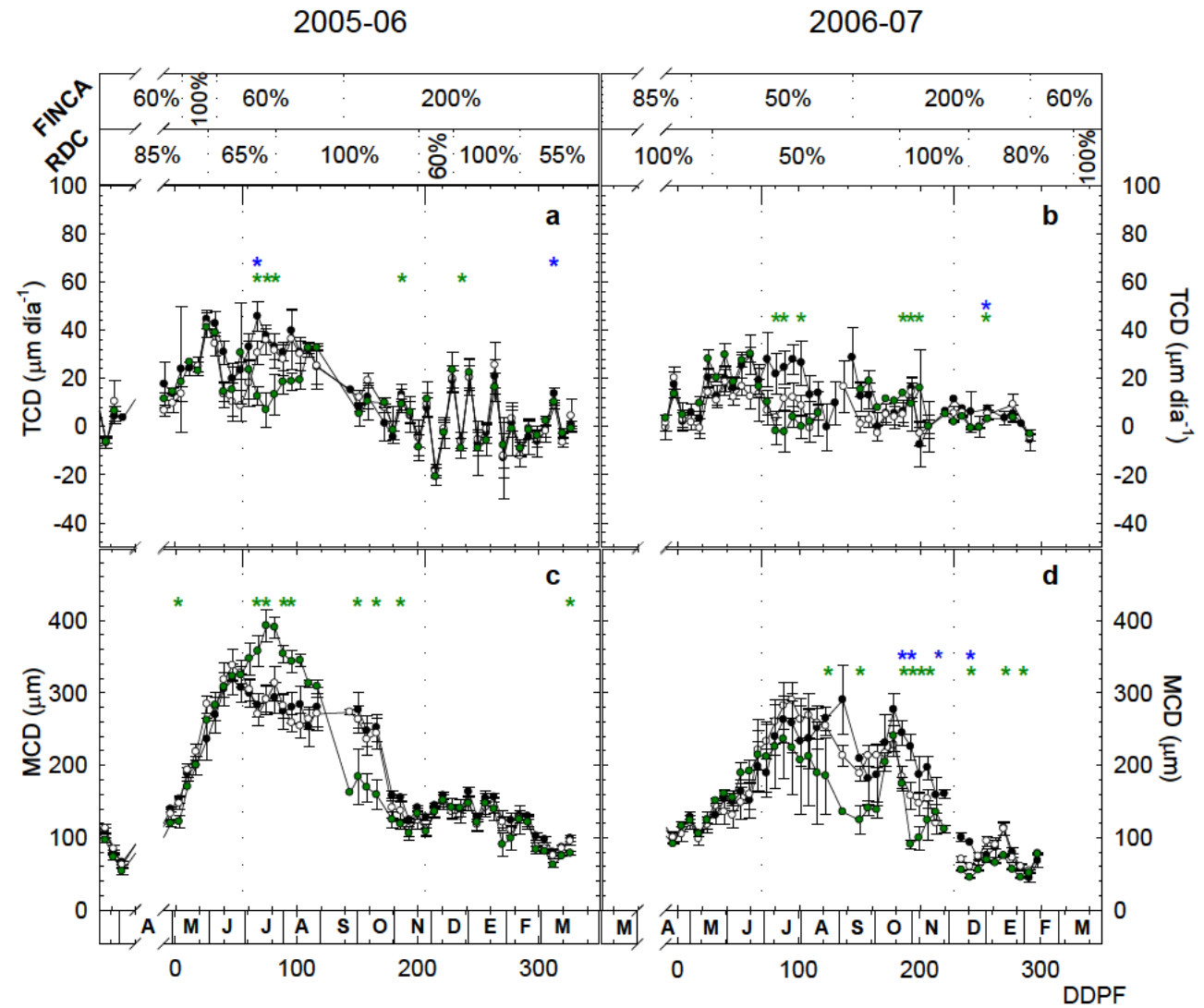
Máxima contracción diaria del tronco

La máxima contracción diaria del diámetro de tronco (MCD) presentó valores máximos en todos los tratamientos durante la fase II del crecimiento del fruto y mínimos durante la III, coincidiendo con los meses de mayor y menor demanda evaporativa, respectivamente (Figura 4.7).

Durante la primera campaña MCD se vio afectada por los diferentes tratamientos de riego ensayados, si bien durante la segunda se igualaron los valores en todos los tratamientos. Así, en el ciclo 2005-06, RDC mantuvo los niveles de CTL cuando se le sometió a una reducción del 35% en las dosis de riego respecto a CTL. En cambio FINCA superó a los de CTL en unos 102 μm tras 40 días sometido a un déficit del 40% (Figura 4.7c). Los valores de MCD registrados en FINCA fueron significativamente inferiores a CTL cuando se restituyó el riego a los niveles de éste en los dos primeros años de ensayo, ocurriendo lo mismo en RDC durante la campaña 2006-07 (Figura 4.7c, d).

La figura 4.8 representa FDT durante el periodo 105-141 DDPF en 2007-08, época de alta demanda evaporativa y momento en que RDC y RDC_{50} fueron sometidos a un déficit hídrico del 50 y 75% del agua aportada a CTL. Contrariamente, el tratamiento FINCA se encontraba en recuperación desde el día 110 DDPF.

Figura 4.7. Evolución de la tasa de crecimiento (TCD) y de la máxima contracción diaria del diámetro del tronco (MCD) en los diferentes tratamientos de riego (CTL-●; RDC-○; FINCA -●-) durante las campañas 2005-06 y 2006-07. Cada punto representa la media de los valores semanales. Los asteriscos indican diferencias de los tratamientos RDC (*) y FINCA (*) con CTL según test de Rango Múltiple de Duncan ($P<0,05$). Las líneas verticales indican la separación entre fases fenológicas según el crecimiento del fruto. Las barras superiores indican los aportes de agua en relación al control en cada uno de los tratamientos estudiados.



Se pone de manifiesto la alta sensibilidad al déficit hídrico de la fluctuación del diámetro del tronco y de sus parámetros. Así, CTL mantuvo una tasa de crecimiento diario del tronco (TCD) en torno a $20 \mu\text{m día}^{-1}$, con un valor de Ψ_t de $-1,1 \text{ MPa}$, en cambio RDC disminuyó e incluso detuvo el crecimiento del tronco cuando Ψ_t alcanzó $-1,5 \text{ MPa}$, siendo MCD similar a la de CTL. Los valores más elevados de MCD se dieron en RDC₅₀, que alcanzó valores máximos de $350 \mu\text{m}$ durante el periodo indicado, y con una ralentización del crecimiento al incrementar el déficit hasta -2 MPa , promediando $0,37 \mu\text{m día}^{-1}$ para este periodo, en el que se registraron valores negativos (Figura 4.8). La fotosíntesis neta disminuyó en este tratamiento hasta $1,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, mientras que en CTL era de $5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (datos no mostrados). Por otro lado, FINCA mostró en la recuperación un aumento en la velocidad de crecimiento, alcanzando una TCD máxima de $22 \mu\text{m día}^{-1}$, siendo mayor que CTL. De lo anterior se constata que TCD detectó el déficit hídrico al igual que MCD durante esta fase.

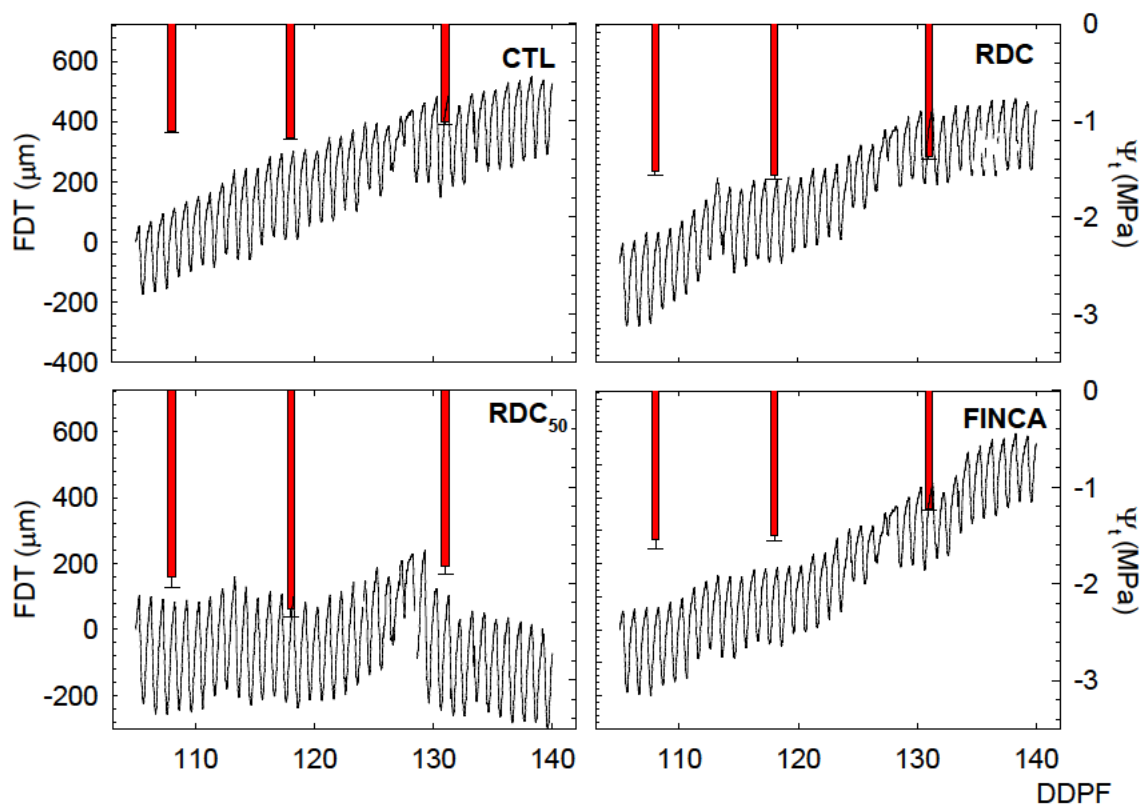


Figura 4.8. Detalle de la fluctuación del diámetro del tronco (FDT) en los cuatro tratamientos de riego en la campaña 2007-08 en el periodo: 2 agosto – 6 septiembre. Cada línea refleja la media de ocho dendrómetros. Las barras verticales muestran valores medios de potencial de tallo (Ψ_t). Cada barra representa la media de ocho medidas.

La estrecha correlación encontrada entre Ψ_t y MCD (Figura 4.9) definió un valor umbral de Ψ_t a partir del cual MCD disminuyó, que fue menos patente en la segunda campaña, posiblemente debido a la presencia de salinidad en el agua de riego. Así, mientras que en la primera campaña, se alcanzaron valores máximos de 312 μm para -1,4 MPa, en la siguiente se llegó a un máximo de 251 μm para -1,8 MPa, denotándose un menor nivel para el agotamiento de reservas de agua. Este hecho puede ser motivado por los mecanismos de adaptación al estrés que el árbol pone en marcha, provocando que, a partir de un cierre estomático pierda menos agua y por tanto disminuya la contracción del diámetro del tronco, tal y como lo indican algunos investigadores (Hinckley y Bruckerhoff, 1975; Ortuño *et al.*, 2010). Lo que podría explicar la ausencia de diferencias en los valores de MCD entre CTL y los deficitarios en ciertos momentos de la campaña 2006-07.

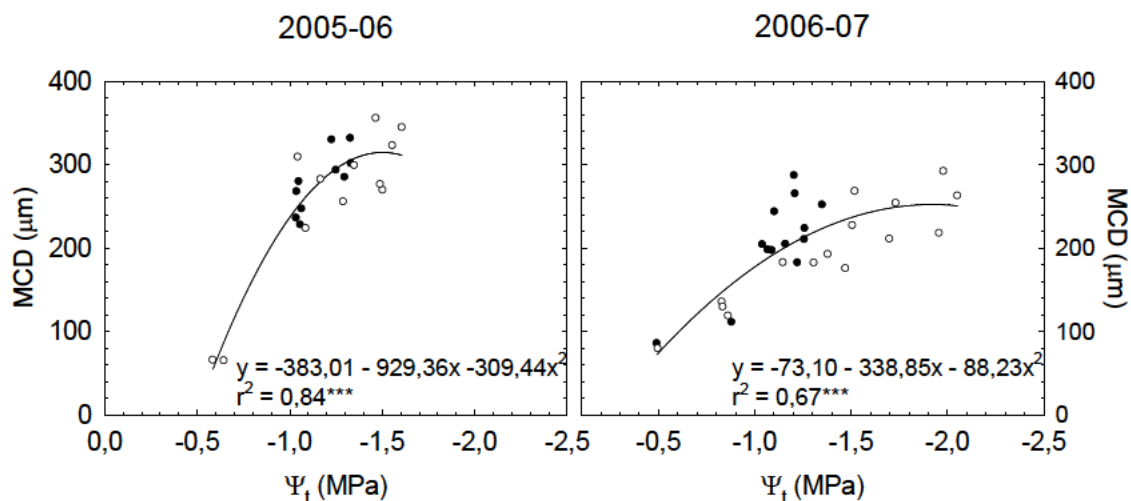


Figura 4.9. Relación entre el potencial hídrico de tallo (Ψ_t) y la máxima contracción diaria del diámetro del tronco (MCD) en los tratamientos CTL (●) y RDC (○) en las fases I y II de las campañas 2005-06 y 2006-07.

Parámetros de intercambio gaseoso

La fotosíntesis neta (P_n) y conductancia estomática (g_s) presentaron en los tratamientos ensayados sus valores máximos y mínimos durante el otoño y verano, respectivamente, con una mayor fluctuación que los de Ψ_t . Así, CTL registró sus valores mínimos en julio (1,48 y 1,92 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de P_n en 2006 y 2007, respectivamente, y 24,67 y 29,13 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de g_s) y máximos a finales del verano

(8,85, 6,17 y 5,25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de P_n en 2005, 2006 y 2007, respectivamente, y 170, 143,75 y 91,83 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de g_s).

Esta tendencia estacional ha sido observada por otros autores en naranjo (Moreshet y Green, 1984; Pérez-Pérez, 2005) o limonero Fino (Domingo *et al.*, 1996; Ortuño *et al.*, 2006a) independientemente del régimen de riego aplicado, siendo una característica de los cítricos la disminución de los valores de g_s como resultado del incremento de la demanda evaporativa de la atmósfera (Ruiz-Sánchez *et al.*, 1997) o del aumento de las temperaturas durante los meses de verano. En este sentido, Sun y Ma (1999) afirman que las temperaturas óptimas para el desarrollo de los cítricos se encuentran entre 22 y 30 °C, y en la zona de estudio se alcanzaron temperaturas muy superiores (Figura 4.10) lo que puede provocar un cierre estomático (Zhang *et al.*, 1995). Guo *et al.* (2006) observaron una disminución de P_n en mandarino Satsuma y naranjo Navel sometidos a temperaturas de 38°C, recuperándose los niveles iniciales tras diez días sometiendo las plantas a 25°C. Por otro lado, Vu y Yelenosky (1987) hablan de la influencia de la temperatura en los parámetros fotosintéticos, presentando la posibilidad de que se dé alguna alteración en el metabolismo del carbono fotosintético en el tejido foliar del naranjo Valencia sujeto a condiciones de aclimatación en frío.

Los valores máximos de P_n observados en este estudio ($\approx 8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) estuvieron en consonancia a los registrados en cítricos por Iglesias *et al.* (2002) y Papadakis *et al.* (2004), aunque fueron inferiores a los obtenidos por Pérez-Pérez (2005) en naranjo (12-14 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Los valores máximos de g_s encontrados en la bibliografía para cítricos oscilan entre los 200 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Raveh *et al.*, 2003; García-Tejero *et al.*, 2010), 150-170 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Pérez-Pérez, 2005) y 120 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Papadakis *et al.*, 2004).

Aunque los bajos valores de g_s en cítricos ya han sido registrados por otros autores independientemente de la dosis de riego aplicada (Domingo *et al.*, 1996), el riego con agua salina podría explicar la disminución de los valores máximos de g_s conforme avanzaba el ensayo. La disminución de los valores de P_n y g_s por influencia de la salinidad ha sido observada en cítricos (Bañuls y Primo-Millo, 1992;

Gómez-Cadenas *et al.*, 1998; Romero-Aranda *et al.*, 1998; Arbona *et al.*, 2005) y otros cultivos como el nisperero (García-Legaz *et al.*, 2008).

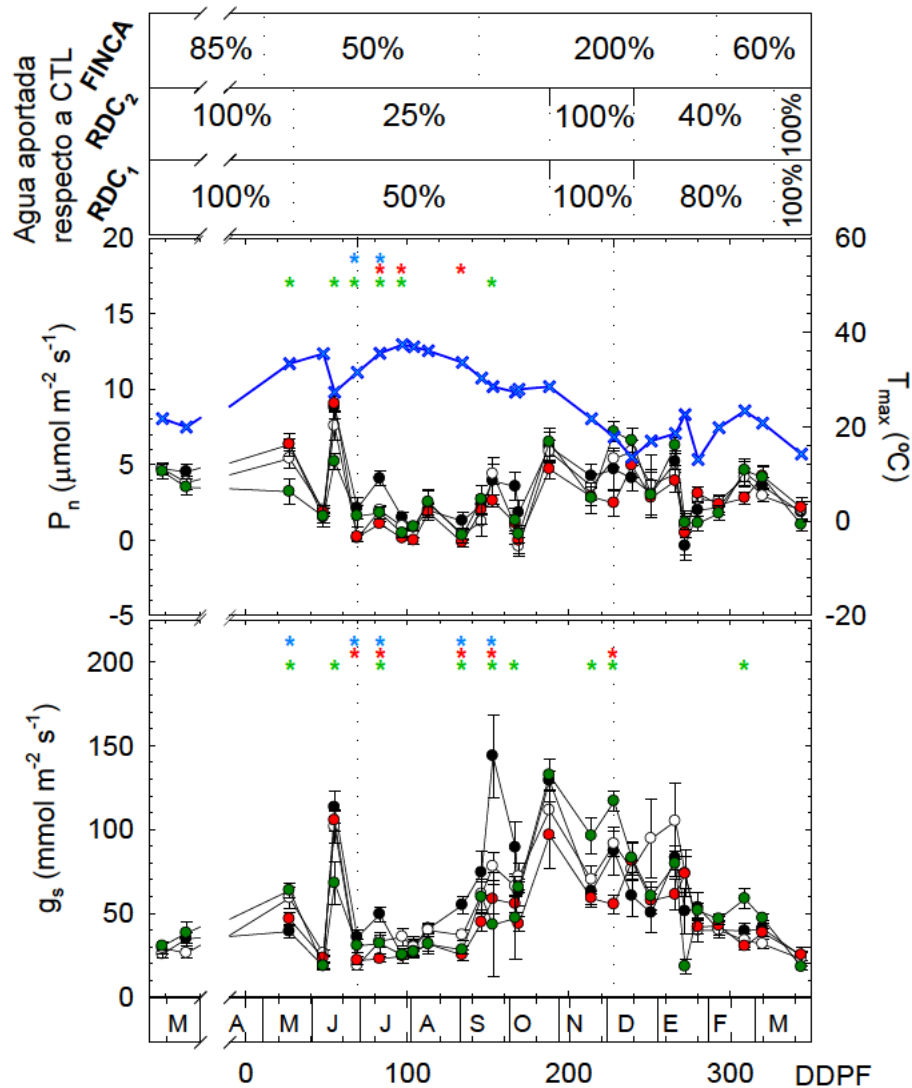


Figura 4.10. Evolución de la fotosíntesis neta (P_n) y la conductancia estomática (g_s) de los diferentes tratamientos de riego (CTL—●—; RDC—○—; RDC₅₀—●—; FINCA—●—) y la temperatura máxima en los días de medida (—×—) durante la campaña 2006-07. Cada punto corresponde a la media de 4 repeticiones. Los asteriscos indican diferencias de los tratamientos RDC (*) RDC₅₀ (*) y FINCA (*) respecto a CTL según test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$). Las barras superiores indican los aportes de agua en relación a CTL en cada uno de los tratamientos estudiados.

En cuanto al déficit hídrico aplicado, aunque ambos parámetros mostraron diferencias entre los tratamientos deficitarios y CTL en los momentos en que se aplicó déficit, estas diferencias no fueron tan claras como las que se obtuvieron con las medidas de Ψ_t . RDC₅₀ registró los valores más bajos de los dos parámetros durante todo el periodo de déficit, y cuando se restituyó el riego a los niveles de CTL fue el más lento en recuperarse.

La disminución de los parámetros de intercambio gaseoso en cítricos sometidos a déficit hídrico ha sido observada por otros autores (Ruiz-Sánchez *et al.*, 1997; Medina *et al.*, 1999; Ortuño *et al.*, 2004; Romero *et al.*, 2006; Wu y Xia, 2006; García-Tejero *et al.*, 2010). Pérez-Pérez *et al.* (2008a) si bien afirman que plantas de Lane late injertadas tanto en Carrizo como en Cleopatra mostraron una disminución en los valores de los parámetros de intercambio gaseoso al estar sometidos a déficit hídrico, Cleopatra redujo estos valores menos que Carrizo mostrando mejor comportamiento ante las condiciones de estrés hídrico. Ruiz-Sánchez *et al.* (1997) afirman que la recuperación de g_s es más lenta que la de Ψ_a y Ψ_{md} en limonero. El comportamiento estomático bajo condiciones de estrés hídrico también está relacionado con cambios hormonales en la hoja tales como el incremento de ácido abscísico y/o la disminución de las citoquininas (Davies y Zhang, 1991).

La relación lineal encontrada entre los valores de g_s y P_n confirman el comportamiento similar de ambas variables en los distintos tratamientos de riego (Figura 4.11), por lo que existe una clara influencia de la conducta del estoma sobre la actividad fotosintética (Chaves *et al.*, 1987).

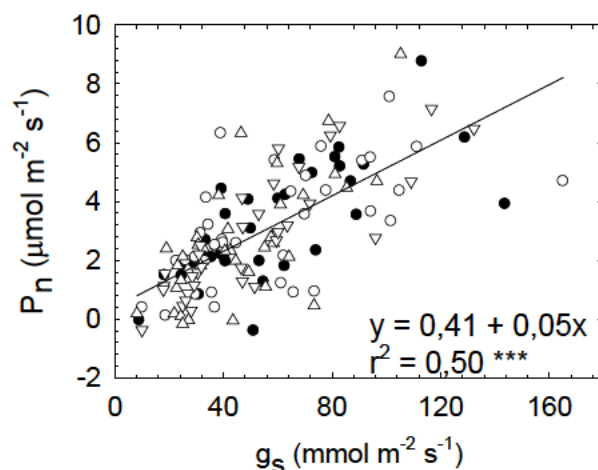


Figura 4.11. Relación entre la conductancia estomática (g_s) y la fotosíntesis neta (P_n) en los diferentes tratamientos de riego: CTL (●); RDC (○); RDC₅₀ (Δ); FINCA (▽) para las tres fases de crecimiento del tronco de las campañas 2006-07 y 2007-08.

4.3.4. Estado nutricional del cultivo

Los análisis foliares realizados en los años 2006 y 2007 mostraron niveles óptimos para la generalidad de los elementos nutritivos, a excepción del contenido en nitrógeno en 2007 en los tratamientos CTL y FINCA y en fósforo en los dos

años, que resultó bajo en ambos casos. Contrariamente los iones Na^+ y Cl^- presentaron niveles altos en 2007. El riego regular con agua de alta salinidad durante 2006 y 2007 provocó una disminución relativa en las concentraciones de nitrógeno y potasio y un aumento en los niveles de sodio y cloruro (Tabla 4.5), pasando de valores medios a bajos en el caso del nitrógeno, de altos a excesivos en el caso del sodio y de medios a altos en el cloruro (Embleton *et al.*, 1973). Otros autores también han observado la acumulación de sodio y cloruro en cítricos regados adicionando NaCl al agua de riego (Bañuls y Primo-Millo, 1992; Gómez-Cadenas *et al.* 1998; Romero-Aranda *et al.*, 1998; García-Sánchez *et al.*, 2005 y 2006). Por otro lado, Romero-Aranda *et al.* (1998) observaron una disminución en la concentración de calcio y potasio en plantas regadas con NaCl. La disminución de nitrógeno detectada el segundo año puede ser explicada por la interrelación entre la absorción de NO_3^- y Cl^- , que suele citarse como antagónica (Fisarakis *et al.*, 2001; Silveira *et al.*, 2001), lo que aconsejaría un aporte mayor de N al recomendado bajo condiciones no salinas.

Tabla 4.5. Análisis foliar realizado en muestras tomadas en noviembre.

	2006				2007			
	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
Nitrógeno total (N) (%)	2,61	2,68	2,60	2,41	2,29 b	2,41 a	2,40 a	2,26 b
Fósforo (P) (%)	0,10	0,10	0,09	0,10	0,09 b	0,11 a	0,10 ab	0,10 ab
Potasio total (K) (%)	1,07	0,99	1,15	1,03	0,79 a	0,93 a	0,83 a	0,78 a
Calcio total (Ca) (%)	3,44	4,04	3,65	3,91	4,20 b	5,30 a	5,04 ab	5,44 a
Magnesio total (Mg) (%)	0,33	0,34	0,34	0,35	0,33 b	0,38 ab	0,35 b	0,42 a
Sodio total (Na) (%)	0,25	0,23	0,28	0,24	0,46 a	0,64 a	0,50 a	0,50 a
Cloro (Cl) (%)	0,28	0,23	0,29	0,22	0,48 bc	0,50 ab	0,58 a	0,40 c

Las letras indican diferencias entre tratamientos según el test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$).

El análisis estadístico realizado en los datos de la última campaña mostró mayor concentración de calcio en RDC y FINCA (28%) que en CTL, así como un incremento en la concentración de cloro en RDC₅₀ respecto a CTL (21%) y FINCA (45%), y de RDC respecto a FINCA (25%). Por otro lado, la concentración de magnesio resultó superior a CTL en el caso de FINCA (27%).

La mayor concentración de cloro en los tratamientos deficitarios puede estar relacionada con un incremento en la acumulación de sales en la zona radicular como consecuencia de la aplicación de riego deficitario controlado (Romero, 2002).

4.3.5. Crecimiento vegetativo

La sección transversal del tronco (STT), obtenida a partir de medidas con cinta métrica, partió al inicio del ensayo (abril de 2005) de valores similares en todos los tratamientos de riego (Tabla 4.6). Δ STT presentó valores estadísticamente diferentes entre tratamientos desde la primera campaña, resultando FINCA inferior en un 50 y 45% a CTL y RDC, respectivamente. RDC₅₀ disminuyó notablemente su STT con respecto al resto de tratamientos durante su aplicación (los dos últimos años de ensayo).

Tabla 4.6. Sección transversal del tronco (STT) y variación de la sección transversal del tronco (Δ STT) en mandarino cv. Fortune en los diferentes tratamientos de riego, durante los años de estudio.

	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
	STT (cm ²)			
2005	163,0 a	179,5 a	-	179,2 a
2006	175,3 a	189,2 a	161,4 a	184,0 a
2007	185,9 ab	193,0 a	164,4 b	184,4 ab
2008	195,2 a	199,4 a	169,7 b	197,7 a
	Δ STT (cm ²)			
2005-06	14,1 a	12,7 a	-	7,0 b
2006-07	11,6 a	4,3 b	5,3 b	6,2 b
2007-08	9,2 a	6,4 a	5,5 a	8,1a
2006-08	19,0 a	10,3 b	8,9 b	11,5 b

Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$).

El crecimiento del tronco obtenido a partir de sensores LVDT, fue, durante el segundo año, inferior al primero (Figura 4.12), concretamente un 29, 67 y 25% menor para CTL, RDC y FINCA, respectivamente. Similar pauta fue registrada con las medidas realizadas con cinta métrica (Tabla 4.6). Este menor crecimiento en CTL se atribuye al efecto osmótico derivado del aumento de la salinidad en el agua de riego (Romero-Aranda *et al.*, 1998; Ruiz *et al.*, 1999; García-Sánchez *et al.*, 2005), junto a la acumulación de sodio y cloruro a nivel foliar (Tabla 4.5). Diversos autores señalan el efecto inhibidor del cloruro (Chapman, 1968; Walker *et al.*, 1982; Bañuls *et al.*, 1997), sodio (Behboudian *et al.*, 1986; Lloyd *et al.*, 1987b; Lloyd y Howie, 1989; Lloyd *et al.*, 1990) o por ambos elementos (Lloyd *et al.*, 1989; Bañuls y Primo-Millo, 1992) en el crecimiento de los cítricos.

El régimen de riego también afectó al crecimiento del tronco (Figura 4.12). Durante la campaña 2005-06, mientras CTL presentó los valores más elevados de TCD con $43 \mu\text{m día}^{-1}$ en la fase II del crecimiento del fruto, RDC los redujo un 20% durante la aplicación del déficit hídrico (Figura 4.7); pero la temprana restitución del riego le permitió alcanzar los valores de CTL al final del ciclo del cultivo gracias a un crecimiento compensatorio del tronco (Figura 4.12). En cambio FINCA finalmente disminuyó un 24% con respecto al resto de tratamientos debido a que el déficit hídrico, aún siendo de la misma intensidad que en RDC, fue más prolongado, y a pesar del volumen de agua aplicado durante la recuperación (200% de CTL) no logró igualar al control.

Durante la segunda campaña, CTL mostró una TCD máxima de $31,3 \mu\text{m día}^{-1}$, inferior a la del primer año (Figura 4.7). El déficit aplicado influyó de igual manera que en la campaña anterior, resultando en este caso el crecimiento en RDC inferior tanto a CTL (54 %) como a FINCA (43 %), al ser el déficit hídrico más prolongado en este tratamiento (Figura 4.12).

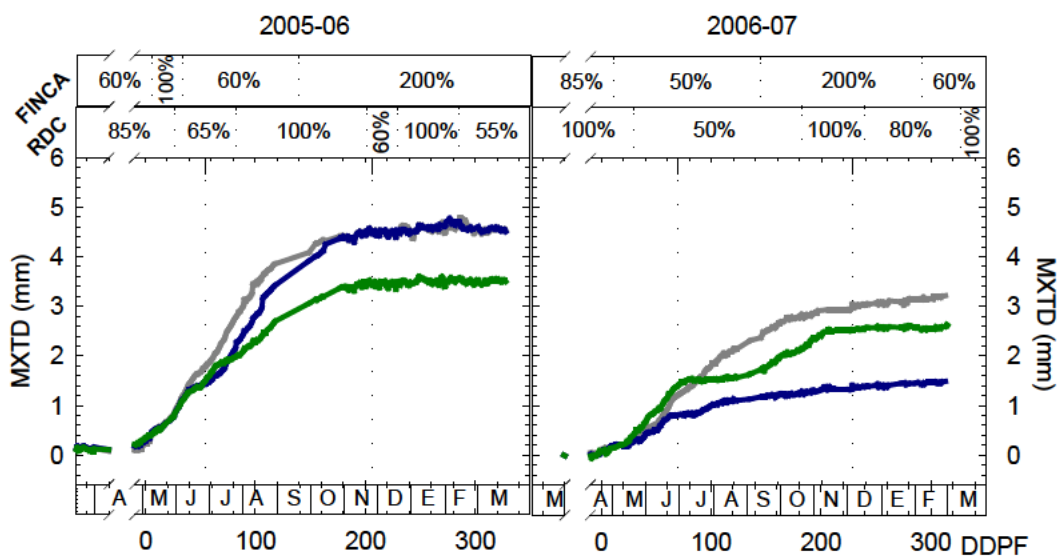


Figura 4.12. Evolución de los valores máximos de diámetro de tronco obtenidos por los dendrómetros (MXTD) para los tratamientos: CTL (—), RDC (—) y FINCA (—) durante las campañas 2005-06 y 2006-07. Las líneas verticales indican la separación entre fases fenológicas según el crecimiento del fruto. Las barras superiores indican los aportes de agua en relación al control en cada uno de los tratamientos estudiados.

Por tanto la reducción del crecimiento vegetativo viene determinado, no sólo por la intensidad del déficit hídrico sino por la duración y el momento de aplicación del mismo, siendo más sensible durante la fase de crecimiento activo (Fase I y II del

fruto) que durante la fase III (Figuras 4.8 y 4.12). Esto coincide con lo observado por González-Altozano y Castel (2003b) en 'Clementina de Nules'. En la figura 4.13 se muestra la estrecha correlación obtenida entre ΔSTT y la integral de estrés hídrico, en cambio no se vio la influencia del volumen total de agua aplicada (VAA) en este parámetro.

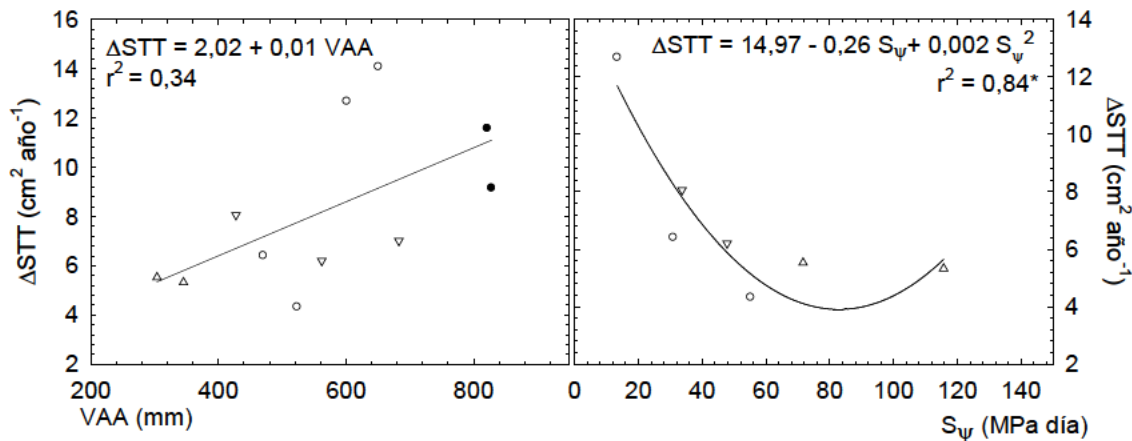


Figura 4.13. Correlación en los diferentes tratamientos de riego, CTL (●); RDC (○); RDC₅₀ (Δ); FINCA (∇), entre la variación de la sección transversal del tronco (ΔSTT) y el volumen de agua aplicada (VAA) (a). Correlación entre la ΔSTT y la integral de estrés ($S\psi$) (b). Cada punto representa la media de cuatro repeticiones. * indica significación a $P < 0,05$.

Con respecto a la cantidad de madera eliminada en la poda, las primeras diferencias significativas entre tratamientos de riego comenzaron a partir del segundo año (Figura 4.14), siendo inferiores a CTL en RDC (37%) y RDC₅₀ (27%). Las cantidades de poda correspondientes al último año fueron las menores del período experimental, probablemente debido a la fecha en que se llevó a cabo (a mediados de julio), momento en que la planta todavía está en periodo de crecimiento vegetativo. Durante este año sólo RDC₅₀ y FINCA mostraron valores inferiores a CTL (Figura 4.14). A pesar de la influencia del estrés hídrico que se refleja en estos valores, no se obtuvo correlación alguna entre la poda, $S\psi$ y VAA.

La bibliografía refleja en numerosas ocasiones la influencia del déficit hídrico en el crecimiento vegetativo de diversos cultivos. De hecho, Chalmers *et al.* (1981) y Mitchell y Chalmers (1982) desarrollaron el RDC como una estrategia de control del crecimiento vegetativo en melocotonero. Shackel *et al.* (1997) vieron, aparentemente, diferencias sustanciales en el tamaño de la copa de almendros al final de la primera estación de crecimiento y obtuvieron una fuerte relación lineal entre STT y la media

de Ψ_t al final de la segunda estación de crecimiento ($r^2=0,78$, $P < 0,001$). En cítricos, Domingo *et al.* (1996) encontraron una parada de crecimiento en brotes de limonero Fino en el periodo de floración y fructificación, lo que podría asociarse a una competencia y redistribución de asimilados. Wu y Xia (2006) observaron reducciones en el crecimiento vegetativo de plántulas de *Citrus tangerine* sometidas a estrés hídrico. Romero *et al.* (2006) muestran una reducción en el desarrollo vegetativo de mandarinos Clemenules sometidos a tres años de déficit hídrico que fue mayor en aquellos árboles injertados sobre Carrizo que en los injertados sobre Cleopatra. Del mismo modo, Pérez-Pérez *et al.* (2008a) observaron una disminución en el desarrollo de la copa de naranjos Lane late después de tres años de déficit hídrico aplicado en las fases I y II del crecimiento del fruto, mientras vieron un aumento de la ΔSTT del tronco en estos árboles respecto al control.

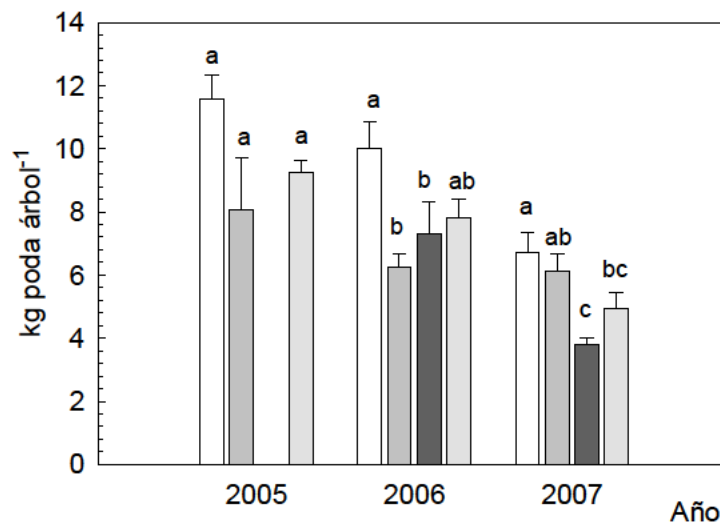


Figura 4.14. Madera eliminada por la poda en los tres años de ensayo (CTL ■; RDC ▒; RDC₅₀ ■; FINCA ▒). Cada barra representa la media de 20 árboles. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$).

4.3.6. Crecimiento del fruto

La dinámica de crecimiento del fruto fue similar en los tres años de estudio (Figura 4.15d-f). En todos los casos describió una curva sigmoide, típica de frutos cítricos, en la que quedan delimitadas las tres fases de desarrollo del fruto: Fase I (periodo de crecimiento exponencial), fase II (periodo de crecimiento lineal) y fase III (periodo de maduración).

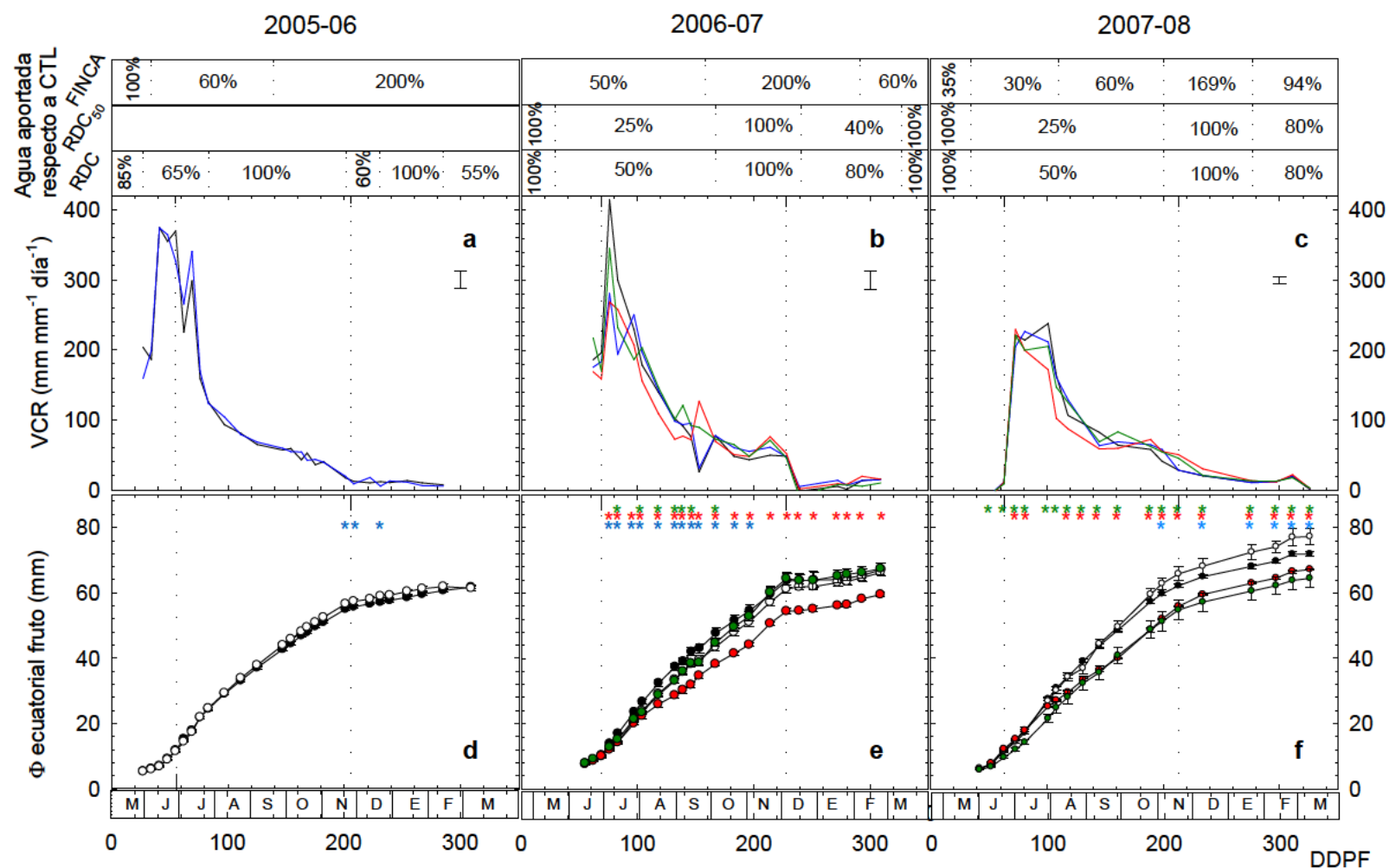


Figura 4.15. Velocidad de crecimiento relativa del fruto (VCR) para los tratamientos ensayados (CTL —; RDC —; RDC₅₀ —; FINCA —) en los tres años de estudio (a, b, c), y evolución del crecimiento del fruto (CTL—●—; RDC—○—; RDC₅₀—●—; FINCA—●—) (d, e, f). Los asteriscos indican diferencias de RDC (*) RDC₅₀ (*) y FINCA (*) respecto a CTL según test de Rango Múltiple de Duncan (P<0,05). Las barras verticales marcan las diferentes fases del crecimiento del fruto. Las barras superiores muestran los aportes hídricos para los tratamientos deficitarios en relación a CTL.

Durante la aplicación del déficit hídrico la velocidad de crecimiento del fruto (VCR) disminuyó en los tratamientos deficitarios en relación a CTL y se incrementó tras la recuperación del riego en estos tratamientos (Figura 4.15a-c), mostrando un crecimiento compensatorio que permitió que en la campaña 2005-06, RDC, y en 2006-07, RDC y FINCA alcanzasen valores de diámetro de fruto similares a los de CTL, llegando RDC incluso a superarlos (7%) en 2007-08 (Figura 4.15d-f), motivado por su menor carga productiva (Tabla 4.7). Las diferencias máximas de Ψ_t con respecto a CTL, cifradas en 1,1 MPa para RDC₅₀ limitó el crecimiento del fruto impidiendo que alcanzase el tamaño de CTL, mientras que los tratamientos RDC y FINCA, con diferencias de 0,7 y 0,9 MPa respectivamente, en la segunda campaña mantuvieron frutos de tamaño similar al tratamiento CTL, si bien hay que tener en cuenta que FINCA presentó una carga productiva inferior a CTL. Pérez-Pérez *et al.* (2008b) no observaron una disminución de la VCR hasta la tercera campaña de aplicación de RDC, disminución que tuvo lugar tan sólo en las épocas de restricción de riego. Adicionalmente, estos autores observaron un aumento de la VCR tras la restitución del riego en aquellos árboles injertados sobre citrange Carrizo pero no en los injertados sobre mandarino Cleopatra.

La dinámica de crecimiento del fruto resultó similar a la del tronco, dibujando en ambos casos una curva sigmoide con un desfase de 40 días, tanto al inicio como con la finalización del crecimiento del tronco. Al finalizar el crecimiento del tronco el fruto había alcanzado el 80% de su tamaño final. Ambos parámetros resultaron altamente correlacionados (Figura 4.16).

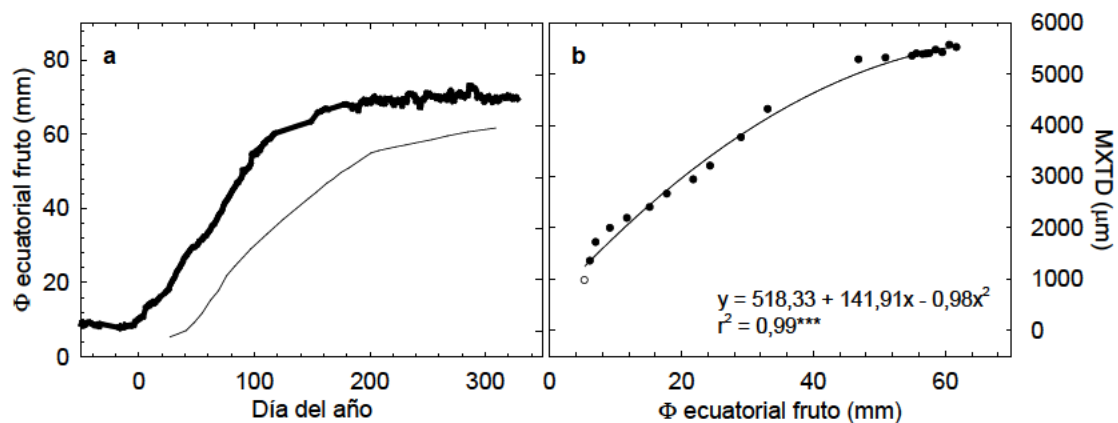


Figura 4.16. Evolución del crecimiento de fruto (—) y tronco (---) en el tratamiento CTL (a). Correlación entre el diámetro ecuatorial del fruto (Φ) y el valor máximo de diámetro de tronco (MXTD) del tratamiento CTL (b). Valores correspondientes a la campaña 2005-06.

4.3.7. Producción y calidad

Producción

La cosecha obtenida tras el primer año de ensayo osciló entre los 85 y 92 kg árbol⁻¹ en todos los tratamientos. Los dos años siguientes, coincidiendo con el aumento de la salinidad en el agua de riego, la producción en CTL resultó un 70% de la obtenida en 2006 (Tabla 4.7), si bien mantuvo producciones consideradas de alto rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1986). La influencia de la salinidad en la disminución de la producción en cítricos ha sido observada por diferentes autores que, al igual que en el presente trabajo, observaron una disminución en el número de frutos por árbol, como por ejemplo en limonero (Cerdá *et al.*, 1990 y García-Sánchez *et al.*, 2003), naranjo (Dasberg *et al.*, 1991) o mandarino (García-Sánchez *et al.*, 2006). Del mismo modo, Howie y Lloyd (1989) afirman que la intensidad de floración, fructificación y número final de frutos en naranjos Washington navel sobre naranjo dulce se redujo a causa del estrés salino.

Por otro lado, el efecto de los tratamientos de riego sobre los parámetros productivos fue acorde a la intensidad y/o duración del déficit aplicado (Tabla 4.7; Figura. 4.17). Así, RDC no manifestó mermas en la producción respecto a CTL, durante los dos primeros años, en los que se obtuvieron ahorros de agua del 8% y del 36%, respectivamente. En cambio, la reducción de un 43% del agua aplicada durante el tercer año indujo una disminución de un 63% en la producción, debido a un menor número de frutos por árbol.

FINCA presentó una producción similar a CTL durante el primer año, a pesar de que el déficit hídrico fue más prolongado que en RDC; en cambio, la aportación, posterior al déficit, de un 200% de agua con respecto a CTL no indujo ahorro de agua alguno al final de esta campaña. Durante el segundo y tercer año, con una disminución de agua de un 32 y 48%, la producción se redujo de forma significativa en un 26 y 40%, respectivamente, debido al déficit hídrico aplicado durante el período de floración-fructificación (2006-07) y a la acumulación excesiva de salinidad en el suelo (Apartado 4.3.2), similar a lo ocurrido en RDC. La reducción de agua en un 58 y 68%, hizo que RDC₅₀ disminuyera su producción en un 43 y 89% respecto a CTL, durante sus dos años de ensayo (Tabla 4.7; Figura 4.17). Los

valores de reducción en producción están en consonancia con las reducciones observadas en naranjo en función de la salinidad del agua de riego por Ayers y Westcot (1994).

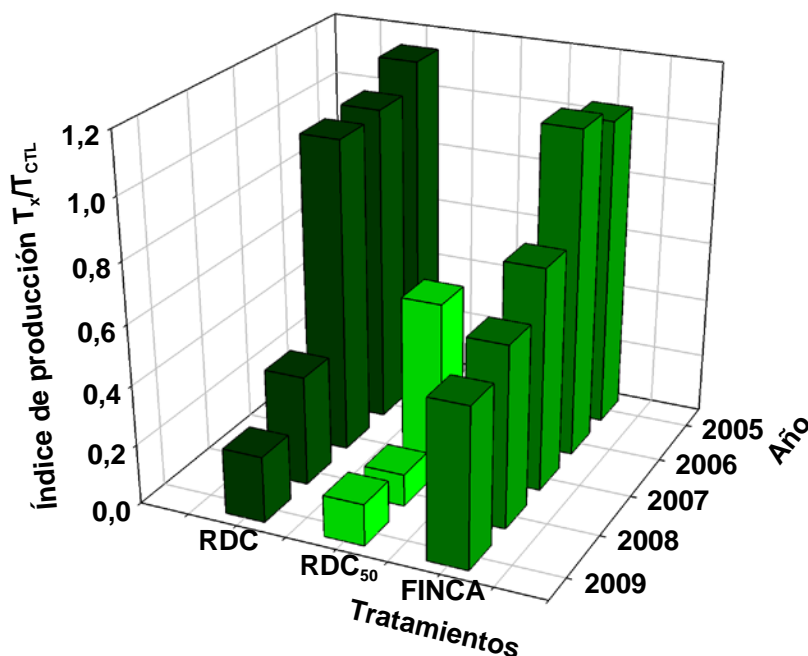


Figura 4.17. Variación del índice de producción (relativo al control) en las cosechas evaluadas.

La bibliografía muestra diferentes respuestas productivas en función de la intensidad y el momento de aplicación de déficit en cítricos. González-Altozano y Castel (1999) con ahorros de agua entre el 6 y el 22%, obtuvieron en clementina similar producción y calidad a los del control, aplicando déficit en verano. Romero *et al.* (2006) observaron una disminución de producción en árboles de mandarina *Clemenules* injertadas sobre *Cleopatra* tras tres años de aplicación de déficit hídrico, en que se suprimió el riego en las fases I y III del crecimiento del fruto, alcanzando valores Ψ_t mínimos de -2 MPa, siendo el n° frutos por árbol la componente más afectada. Treeby *et al.* (2007) no observaron diferencias en carga de cosecha (kg fruta por m² copa) ni en número de frutos por m² pero sí obtuvieron frutos de menor peso fresco y diámetro tras dos años de aplicación de déficit hídrico continuo, en que el tratamiento deficitario recibió la mitad de agua que el tratamiento control, en naranja Navel injertada sobre diferentes patrones. Pérez-Pérez *et al.* (2008b) no observaron diferencias en producción hasta el tercer año de aplicación de déficit, si bien el segundo año el número de frutos por árbol se incrementó significativamente

con el déficit hídrico, reduciendo el peso medio del fruto en relación al control. García-Tejero *et al.* (2010) muestran una clara influencia del tratamiento de riego sobre la producción al observar que un estrés hídrico severo aplicado durante la fase de floración redujo el número de frutos por árbol, mientras un déficit hídrico aplicado durante la fase de crecimiento del fruto produjo una disminución en el tamaño del fruto.

Tabla 4.7. Influencia de los tratamientos de riego en la producción, n° frutos árbol⁻¹ y peso medio del fruto en mandarino cv. Fortune.

	Producción (kg árbol ⁻¹)			
	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
2005	25,2 a	28,7 a	-	26,1 a
2006	84,6 a	89,6 a	-	92,4 a
2007	59,9 a	62,6 a	34,0 b	44,7 b
2008	59,0 a	21,7 c	6,4 d	35,8 b
2009	91,0 a	20,1 bc	12,7 c	48,5 b
	n° frutos árbol ⁻¹			
	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
2005	243 a	267 a	-	228 a
2006	881 a	897 a	-	870 a
2007	445 ab	494 a	341 b	329 b
2008	413 a	146 c	72 c	295 b
2009	732 a	109 bc	65 c	366 b
	Peso medio fruto (g)			
	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
2005	109 a	109 a	-	119 a
2006	98 b	102 b	-	108 a
2007	142 a	131 a	104 b	141 a
2008	143 a	167 a	92 b	129 ab
2009	122 b	223 ab	277 a	140 b

Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Rango Múltiple de Duncan (P<0,05).

Tras un año de recuperación (2008-09), en el que se restituyó el riego a todos los tratamientos para satisfacer la demanda climática y los requerimientos de lavado, se observó un notable incremento en la producción de CTL debido a un mayor número de frutos por árbol, respecto al año anterior. El resto de tratamientos mantuvieron valores inferiores a CTL, aunque la restitución del riego permitió a FINCA incrementar ligeramente su producción y número de frutos; no ocurriendo así en los tratamientos de RDC, que presentaron valores similares al año anterior (Tabla 4.7). Esto puede estar relacionado con los aportes de agua aplicados a FINCA en la fase III de crecimiento del fruto muy por encima de CTL, que

contribuyeron a un mayor lavado de sales del suelo que en los tratamientos RDC (Figura 4.3).

Eficiencia productiva

Los diferentes índices de eficiencia estuvieron influenciados por el incremento de la salinidad del agua de riego y la reducción del crecimiento del tronco en los tratamientos deficitarios. Así la eficiencia del uso del agua de riego (EUA, kg de fruta por m³ de agua de riego) disminuyó en todos los tratamientos a partir del segundo año, llegando a un 50% en CTL y en menor medida en el resto de tratamientos (Tabla 4.8), debido a que la producción fue muy inferior. RDC mostró una EUA muy superior a CTL y FINCA en el segundo año, en cambio se redujo en gran medida durante el tercero, debido a la brusca disminución de la producción. Similar pauta presentó RDC₅₀ que llegó a marcar el valor de EUA más bajo en 2008. FINCA presentó valores similares a CTL durante todo el período experimental (Tabla 4.8).

Tabla 4.8. Influencia de los tratamientos de riego en la eficiencia de uso del agua (EUA) y la distribución de recursos fotosintéticos (ratio producción ΔSTT^{-1} , ratio producción STT^{-1}) durante el periodo experimental.

	Eficiencia en el uso del agua de riego (EUA) (kg m ⁻³)			
	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
2006	8,67 a	9,94 a	-	9,02 a
2007	4,87 c	7,98 a	6,56 ab	5,29 bc
2008	4,75 a	3,13 b	1,43 c	5,32 a
	Eficiencia productiva (Producción STT^{-1}) (kg cm ⁻²)			
	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
2006	0,49 a	0,47 a	-	0,50 a
2007	0,34 a	0,33 a	0,19 b	0,24 b
2008	0,32 a	0,08 c	0,03 c	0,17 b
	Producción ΔSTT^{-1} (kg cm ⁻²)			
	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
2006	6,33 a	8,05 a	-	8,39 a
2007	7,63 b	16,98 a	7,91 b	8,49 b
2008	6,75 a	2,24 b	0,90 b	8,68 a

Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Rango Múltiple de Duncan (P<0,05).

La eficiencia productiva (EP, kg de fruta por cm² de STT) mostró los valores más elevados en CTL. Únicamente RDC presentó valores similares a CTL hasta el segundo año, reduciéndose de forma significativa en el tercero (Tabla 4.8). La

relación entre la producción y el incremento de la sección del tronco (ΔSTT), parámetro utilizado por numerosos autores para cuantificar la separación de los recursos fotosintéticos destinados al crecimiento vegetativo y productivo (Ebel *et al.*, 1995; González-Altozano y Castel, 1999; Pérez-Pastor *et al.*, 2009a), mostró una pauta muy similar a EUA, con valores estadísticamente similares en todos los tratamientos hasta el segundo año, reduciéndose en el tercero únicamente en RDC y RDC₅₀.

Pérez-Pérez *et al.* (2008b) en un ensayo realizado con agua no salina en naranjo Lane late injertado sobre Cleopatra, no vieron diferencias en el reparto de recursos hasta el tercer año de ensayo en que el ratio producción ΔSTT^{-1} disminuyó respecto al control. Sin embargo, ellos observaron mayor EUA desde el primer año.

La relación entre la disminución de la producción y la del agua aplicada presentó un elevado coeficiente de correlación (Figura. 4.18), encontrándose una relación lineal a partir de un 35% de reducción de agua, motivada por la respuesta de RDC al déficit aplicado en 2007. S_{Ψ} no mostró una buena correlación con la producción (datos no mostrados), lo que coincide con lo observado por Pérez-Pérez (2005) en naranjo Lane late injertado sobre Cleopatra.

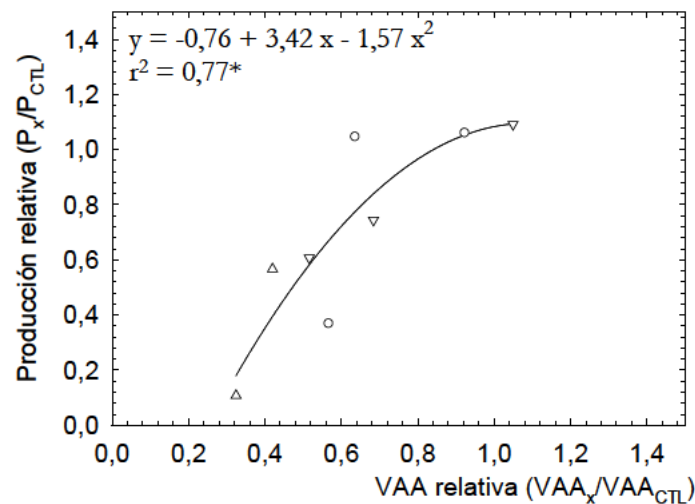


Figura 4.18. Correlación entre el índice de producción (P_x/P_{CTL}) y el volumen de riego relativo (VAA_x/VAA_{CTL}). Cada punto corresponde a la media de cuatro repeticiones.

* indica significación a $P < 0,05$. RDC (○); RDC₅₀ (Δ); FINCA (▽).

Calidad del fruto

Los tratamientos de riego influyeron en los atributos de calidad evaluados en la cosecha. Mientras que en 2006 el diámetro del fruto no disminuyó, en 2007 sí lo hizo en RDC y RDC₅₀ debido al elevado estrés hídrico que alcanzaron (Tabla 4.4). En 2008 RDC presentó el mayor valor de diámetro de fruto debido a la fuerte reducción de su carga productiva (Tabla 4.7 y 4.9). El espesor de corteza no se alteró hasta la campaña correspondiente a 2008, cuando CTL y FINCA mostraron valores un 19 y 15 % inferiores a RDC y RDC₅₀, respectivamente (Tabla 4.9).

El índice de color Ic disminuyó de forma significativa, mostrando un color naranja menos intenso, cuando el estrés hídrico alcanzó 115 MPa día en RDC₅₀ en 2007; y durante el último año en los dos tratamientos de RDC, por el efecto acumulado del estrés salino. Shackel *et al.* (1997) relacionaron el incremento lineal del color amarillo en pera con la disminución de la media de los valores de Ψ_t .

Tabla 4.9. Influencia de los tratamientos de riego en las características externas de calidad, diámetro ecuatorial, espesor de corteza e índice de color externo (I_c) en mandarina cv. Fortune.

	Diámetro ecuatorial (mm)			
	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
2005	64,5 a	62,0 a	-	64,7 a
2006	59,7 a	61,1 a	-	60,7 a
2007	70,6 a	66,8 c	63,2 d	69,2 b
2008	72,1 b	77,5 a	66,4 c	66,8 c
	Espesor de corteza (mm)			
	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
2005	2,1 a	2,1 a	-	2,1 a
2006	2,2 b	2,3 b	-	2,6 a
2007	2,2 a	2,1 a	2,2 a	2,2 a
2008	1,7b	2,1 a	2,0 a	1,7 b
	I_c			
	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
2005	15,41 a	14,77 a	-	14,99 a
2006	15,68 a	14,88 a	-	15,14 a
2007	14,52 a	14,14 a	12,77 b	14,28 a
2008	15,04 a	13,64 b	12,82 c	14,59 a

Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$).

De la valoración de frutos manchados por *Alternaria* se desprendió que la programación de riego realizada por el agricultor (FINCA) influyó de forma positiva

en la aparición del hongo, resultando superior el número de frutos afectados por árbol al resto de tratamientos (en torno a un 55%-65%) en 2006 y 2008.

En cuanto al contenido de zumo, los frutos analizados obtuvieron un porcentaje superior (Tabla 4.10) al contenido mínimo establecido en la normativa para frutos de mandarino (33%; Reglamento CE 1221/2008).

Los primeros efectos de los tratamientos de riego sobre la composición del fruto aparecieron en la cosecha de 2007, cuando RDC y RDC₅₀ reflejaron un contenido en zumo inferior a CTL ($\approx 10\%$) y mayor porcentaje de corteza (7%-8%), lo que viene explicado por el menor diámetro de fruto (Tabla 4.9). Sólo RDC₅₀ mostró mayor porcentaje de pulpa que CTL (20%), asociado a menores valores de tamaño de fruto en este tratamiento (Figura 4.15; Tabla 4.9). En 2008 las únicas diferencias con CTL las presentó RDC₅₀ en porcentaje de corteza (8%).

Tabla 4.10. Influencia de los tratamientos de riego en la composición del fruto.

	Zumo (%)			
	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
2005	56,68 a	52,77 a	-	56,27 a
2006	56,95 a	59,39 a	-	59,59 a
2007	55,98 a	50,90 b	50,14 b	53,02 ab
2008	50,58 a	48,75 a	45,08 a	49,42 a
	Corteza (%)			
	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
2005	34,69 a	39,61 a	-	36,84 a
2006	32,72 a	32,90 a	-	32,22a
2007	42,37 b	45,49 a	45,64 a	43,47 b
2008	43,50 b	44,66 b	47,08 a	44,66 b
	Pulpa (%)			
	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
2005	6,70 a	5,00 a	-	5,32 a
2006	9,26 a	9,11 a	-	7,89 a
2007	3,17 b	3,54 ab	3,8 a	3,59 ab
2008	3,50 a	4,42 a	4,33 a	3,50 a

Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$).

La calidad del fruto es de vital importancia cuando va dirigido a consumo en fresco. La bibliografía señala que la humedad del suelo tiene un efecto determinante en la calidad de los cítricos, tanto que Levy *et al.* (1979) utilizan parámetros de calidad del fruto de pomelo para diagnosticar el grado de estrés hídrico. Por otro

lado, se ha demostrado que un estrés hídrico moderado puede mejorar la calidad del fruto de algunos frutales (Goldhamer, 1989).

La influencia de un estrés hídrico sobre la composición del fruto ha sido citado en la bibliografía por reducir el contenido de zumo e incrementar el espesor de corteza en pomelo (Levy *et al.*, 1979), limón Verna (Sánchez-Blanco *et al.*, 1989), mandarina Clemenules (González-Altozano y Castel, 2003a) y naranja Lane late (Pérez-Pérez *et al.*, 2009).

La composición química del zumo se vio afectada por el régimen hídrico desde el primer año de ensayo, cuando FINCA obtuvo una reducción en acidez titulable (AT, 14%) y en sólidos solubles totales (SST, 5%) respecto a CTL, consiguiendo un mayor índice de madurez (IM, 11%), lo que podría asociarse al mayor aporte de agua producido en este tratamiento durante la última fase que dio lugar a un efecto de dilución (Sánchez-Blanco *et al.* 1989).

Tabla 4.11. Influencia de los tratamientos de riego en los parámetros internos de calidad (AT: acidez titulable; SST: sólidos soluble totales).

	AT (g ácido cítrico l ⁻¹)			
	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
2005	18,59 a	19,10 a	-	18,88 a
2006	18,90 a	18,24 a	-	16,28 b
2007	20,30 c	22,50 b	24,20 a	19,20 d
2008	15,17 c	18,00 b	20,42 a	15,66 c
	SST (°Brix)			
	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
2005	13,32 a	13,22 a	-	13,25 a
2006	14,55 a	14,33 a	-	13,88 b
2007	13,80 b	15,70 a	16,10 a	15,20 ab
2008	14,25 b	14,42 b	15,58 a	14,00 b
	Índice de madurez			
	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
2005	7,18 a	6,92 a	-	7,02 a
2006	7,71 b	7,86 b	-	8,54 a
2007	6,90 b	7,00 b	6,70 b	7,90 a
2008	9,00 a	7,83 c	7,17 d	8,41 b

Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Rango Múltiple de Duncan (P<0,05).

RDC y RDC₅₀ mostraron mayor contenido de AT que CTL (11 y 19% en 2007, respectivamente, y 19 y 31% en 2008) y de SST en 2007 (14 y 17%, respectivamente). FINCA registró en 2007 una disminución de AT respecto a CTL (6%) que dio lugar a un incremento de IM (14%). En 2008, IM se redujo en los

tratamientos deficitarios respecto a CTL, correspondiéndole el de menor valor a RDC₅₀.

El incremento de SST y AT en cítricos es particularmente notable cuando el RDC es aplicado en la fase III (Ginestar y Castel, 1996a; Gonzalez-Altozano y Castel, 2003; Pérez-Pérez *et al.*, 2009), pero cuando se aplica en fases tempranas de desarrollo puede inducir el efecto opuesto (Ginestar y Castel, 1996a). Sin embargo, en algunos casos de déficit hídrico, se puede producir un mayor aumento de la acidez que de los azúcares, disminuyendo la relación azúcares/acidez y, por tanto, reduciendo la calidad del fruto (Maotani y Machida, 1977; Mougheith *et al.*, 1977; Levy *et al.*, 1978 y 1979).

Conservación frigorífica

El periodo de conservación afectó a la composición del zumo. Así, tras la conservación frigorífica, los valores de SST disminuyeron un 5-8% en los tratamientos deficitarios comparado con los niveles de cosecha (15,2-16,1 °Brix) y no hubo diferencias con CTL excepto en RDC₅₀ quien registró valores superiores (Tabla 4.12). Por otro lado, AT disminuyó en todos los tratamientos en un 15-21% después del almacenamiento, siendo RDC₅₀ el que mostró la menor disminución. En cuanto a IM, los tratamientos FINCA y RDC₅₀ reflejaron un incremento después del almacenamiento en un 19% y un 10%, respectivamente, aunque RDC₅₀ mostró menores valores de IM que CTL y RDC.

Tabla 4.12. Parámetros de calidad del zumo (AT: acidez titulable (g ácido cítrico l⁻¹); SST: sólidos soluble totales (°Brix); IM: índice de madurez) de mandarina Fortune en la cosecha y al final de la conservación (50 días a 5°C + 8 días a 20°C) en los diferentes tratamientos de riego.

	Cosecha				Final de conservación			
	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA	CTL	RDC	RDC ₅₀	FINCA
AT	20,3cA	22,5 bA	24,2 aA	19,2 dA	16,1 cB	18,2 bB	20,6 aB	15,4 cB
SST	13,8b	15,7 aA	16,1 aA	15,2 abA	13,7 b	14,4 bB	15,2 aB	14,5 bB
IM	6,9 b	7,0 b	6,7 bA	7,9 aA	8,5 b	8,1 b	7,4 cB	9,4 aB

Valores seguidos por diferentes letras minúsculas en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos en el momento de la cosecha y tras la conservación por separado, de acuerdo al test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$), mientras que letras mayúsculas distintas para un determinado parámetro e idéntico tratamiento indican diferencias significativas entre el momento de la cosecha y el final de la conservación.

La disminución en AT en naranja Navel y otros frutos cítricos durante el almacenamiento y periodo de comercialización ha sido bien caracterizada (Obeland *et al.*, 2008; Rapisarda *et al.*, 2008). La mayoría de los autores han presentado incrementos en SST y en el ratio SST/AT, aunque en Valencia late SST aumenta cuando los frutos se almacenan por encima de 40 días, aunque puede disminuir a largo plazo durante largos periodos de almacenamiento. Las tendencias en AT y SST pueden estar también afectadas por la temperatura de almacenamiento y pretratamiento (Marcilla *et al.*, 2006). Nuestros resultados apoyan un mejor comportamiento de conservación frigorífica de los frutos obtenidos en riego deficitario controlado debido a los mayores valores de AT y SST obtenidos en la cosecha, como por ejemplo en el caso de RDC₅₀ (Tabla 4.12).

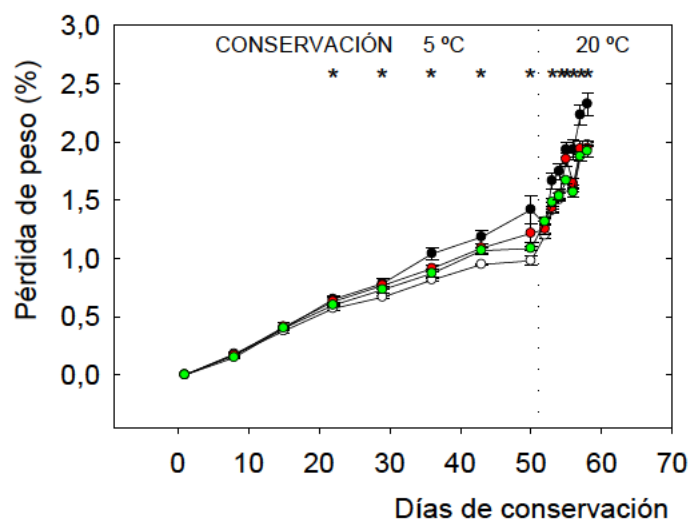


Figura 4.19. Pérdida de peso de mandarinas Fortune durante los 50 días de conservación a 5 °C y el periodo de comercialización de 8 días a 20 °C en los cuatro tratamientos de riego (CTL-●; RDC-○; RDC₅₀-●; FINCA-●). Cada punto corresponde a la media de 12 frutos. Las barras en los puntos de datos indican el error estándar. Los asteriscos indican diferencias con CTL según Test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$).

Después de 50 días de almacenamiento en frío, la pérdida de peso fue significativamente mayor en CTL que en los frutos de los tratamientos deficitarios, sin que entre ellos se dieran diferencias significativas. Los frutos de RDC mostraron la menor pérdida de peso y estas diferencias fueron notables después de la tercera semana de almacenamiento (Figura 4.19). Durante el siguiente periodo de comercialización, la pérdida de peso se incrementó en todos los tratamientos pero fue significativamente mayor en CTL después del tercer día. La menor pérdida de

peso de los frutos de riego deficitario ha sido también citada en melocotoneros (Crisosto *et al.*, 1994) y albaricoquero (Pérez-Pastor *et al.*, 2007) pero bajo menores temperaturas de almacenamiento (0 y 1°C, respectivamente). Schirra y D'hallewin (1997) encontraron mayores pérdidas de peso (de 3,6 a 6,6%) en mandarina Fortune almacenadas a 6 °C durante 30 días con (más 3 días a 20°C) o sin un periodo de comercialización.

4.4. Conclusiones

Los resultados presentados en este capítulo permiten delimitar con base fisiológica el inicio y duración de los periodos más adecuados para la aplicación del déficit hídrico en mandarino cv. Fortune bajo riego deficitario controlado. Así la caracterización de la dinámica de crecimiento del tronco, determinada con la ayuda de dendrómetros, indica el momento de cese del déficit hídrico aplicado durante la fase II de crecimiento del fruto cuando el crecimiento del tronco empieza a ralentizarse, lo que permite a los frutos RDC alcanzar idéntico tamaño final que el de los frutos obtenidos en árboles sin limitación hídrica. Por otro lado, durante las dos primeras campañas, se observó que valores de Ψ_t no inferiores a -2 MPa durante el primer tercio del período crítico de la fase II, no ocasionaron reducciones significativas en la producción.

El mandarino realizó ajuste osmótico con valores de Ψ inferiores a -1,9 MPa, resultado del efecto combinado de déficit hídrico y salinidad.

La salinidad del agua de riego redujo el valor de Ψ_t a partir del cual MCD disminuye (de -1,4 MPa el primer año a -1,8 MPa). Los parámetros de intercambio gaseoso se vieron más influenciados por las condiciones de salinidad presentes en el ensayo que por el déficit hídrico, reflejando menores valores conforme avanzó el ensayo. Los indicadores del estado hídrico de la planta estudiados (Ψ_t , P_n , g_s , MCD y TCD) fueron sensibles al déficit hídrico, si bien Ψ_t detectó con mayor rapidez la aplicación del déficit así como la restitución del riego.

La salinidad del agua de riego en los dos últimos años redujo el crecimiento vegetativo en CTL si bien se mantuvieron producciones consideradas de alto

rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1986). En el tratamiento RDC, la interacción entre salinidad y déficit hídrico causó, después de dos años, una importante reducción del número de frutos por árbol, lo que estuvo acompañado de una concentración más elevada de cloruro en hoja en los tratamientos de RDC. El efecto negativo fue menor en FINCA por el lixiviado de sales producido en la fase III. Este tratamiento mostró, además, un contenido en zumo e índice de color similar a CTL. Sin embargo, presentó el mayor nivel de manchas en la piel del fruto producidas por *Alternaria alternata* durante dos de los tres años de ensayo, depreciando sensiblemente la cosecha.

En cualquier caso, se ha observado que la aplicación de riego deficitario controlado con aguas de elevada salinidad es poco recomendable a los niveles de intensidad aplicados en este trabajo y sólo habría que aplicarlo bajo situaciones de necesidad.

**5. Líneas de referencia basadas en la máxima contracción
diaria del diámetro de tronco**

5.1. Introducción

Se ha comprobado, en un gran número de especies leñosas, que la máxima contracción diaria del diámetro de tronco (MCD), parámetro derivado de la fluctuación diaria del diámetro de tronco (FDT), es muy sensible al déficit hídrico (Huguet *et al.*, 1992; Goldhamer y Fereres, 2001; Moriana y Fereres, 2002; Intrigliolo y Castel, 2004; Nortes *et al.*, 2005; Ortuño *et al.*, 2006a; Conejero *et al.*, 2007a). Así mismo, se ha visto que MCD también depende de la demanda climática. Por ello, es necesario normalizar sus valores para poder utilizarlos en la programación del riego y detectar estrés hídrico en planta (Fereres y Goldhamer, 2003; Ortuño *et al.*, 2009a). Los valores MCD de árboles bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo, reflejan los efectos de la demanda climática en la contracción del tronco; de modo que si se relacionan los valores MCD, así obtenidos, con distintas variables meteorológicas (v. g.: déficit de presión de vapor del aire (DPV), evapotranspiración de referencia (ETo), temperatura (T), etc.) se obtienen las denominadas líneas de referencia o líneas base.

MCD y por lo tanto las líneas de referencia, no sólo dependen del clima y del agua en el suelo, sino que pueden verse afectadas por otros factores, tales como: la fenología del cultivo (Génard *et al.*, 2001; Marsal *et al.*, 2002; Fereres y Goldhamer, 2003; Intrigliolo y Castel, 2004), el tamaño del árbol y la edad (Intrigliolo y Castel, 2006) y la carga de cosecha (Intrigliolo y Castel, 2007; Conejero *et al.*, 2010; Puerto *et al.*, 2010), por lo que se hace necesario comprobar su grado de interacción con estos factores. Además existen otros como la salinidad, cuyo efecto sobre ellas se desconoce.

En este capítulo se evalúa a partir de dos cultivos leñosos, mandarino y almendro: (1) la idoneidad de establecer líneas de referencia procedentes de parámetros derivados de la FDT con variables meteorológicas de fácil adquisición y (2) su estabilidad intra e interanual.

En primer lugar se describen los resultados del ensayo realizado en mandarino cv. Fortune durante las campañas 2005-06 y 2006-07, y a continuación

los correspondientes al realizado en almendros cv. Marta durante el periodo 2006 - 2007.

5.2. Material y métodos

5.2.1. Ensayo en mandarino

Las condiciones experimentales son coincidentes con las recogidas en el capítulo 4 de la presente memoria de tesis (Apartado 4.2).

Los árboles se regaron al 100% de la ETc durante la campaña 2005-06, mientras que en la de 2006-07 se aplicó adicionalmente una fracción de lixiviación del 25%. El diseño estadístico fue de bloques al azar con 4 repeticiones. Cada repetición constó de tres filas de siete árboles cada una, tomando los cinco árboles centrales como testigos y el resto como árboles borde.

Medidas

Los datos meteorológicos: temperatura (T), humedad relativa (HR), radiación solar global (Rs) y lluvia (P) se registraron cada hora a partir de una estación agroclimática automática próxima a la parcela experimental y una sonda instalada en parcela (Apartado 3.2). La evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) fue calculada a partir de la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) y el déficit de presión de vapor (DPV) a partir de T y de HR (Ecuaciones 3.1-3.3). Los subíndices 'm', 'mx' y 'md' utilizados se refieren a la media diaria, máximo diario y al promedio de la variable considerada entre las 10 y 15 h solar, respectivamente.

La influencia de la temperatura en la duración de cada estado fenológico se estudió usando la integral térmica GDH de acuerdo al método denominado ASYMCUR descrito por Anderson *et al.* (1986) (Apartado 3.2). Las temperaturas de referencia escogidas para el cálculo de la integral térmica GDH fueron: 30, 13 y 39 °C para las temperaturas óptima, base y crítica, respectivamente (Agustí, 2003).

El potencial matricial del agua en el suelo (Ψ_m) se obtuvo semanalmente a partir de dos tensiómetros por repetición y se realizaron medidas de potencial hídrico de tallo a mediodía solar (Ψ_t) con cámara de presión según el procedimiento detallado en el capítulo 3 (Apartado 3.4). Para la determinación de Ψ_t se

seleccionaron dos hojas por repetición, próximas al tronco y situadas en la parte sombreada en árboles equipados con sensores LVDT.

FDT se obtuvo a partir de 8 sensores LVDT, uno por árbol y dos por repetición, conectados a un datalogger, según se describe en el apartado 3.4.

El crecimiento vegetativo se evaluó en base a medidas del diámetro del tronco, al final de cada campaña, utilizando el total de árboles testigo. A partir de estas medidas se obtuvo la STT.

El crecimiento del fruto se determinó semanalmente desde el cuajado hasta la recolección con un calibre digital. Las medidas se realizaron en 100 frutos marcados (5 por árbol testigo), situados en el tercio medio del árbol. La producción obtenida se expresó como kg de fruta y número de frutos por árbol.

5.2.2. Ensayo en almendro

El ensayo se llevó a cabo durante 2006 y 2007, en una parcela de almendros (*Prunus dulcis* (Mill.) D.A. Webb) cv. Marta de 1 ha de superficie, localizada en la Estación Experimental Agroalimentaria (ESEA) ‘Tomás Ferro’, en La Palma, Cartagena (37° 41’ N, 0° 57’ E, 45 m de altitud) y perteneciente a la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT).

El clima fue típicamente mediterráneo con valores medios anuales de ETo (Allen *et al.*, 1998) y precipitación de 1250 mm y 338 mm, respectivamente. Los almendros Marta de 7 años de edad al inicio del ensayo están injertados sobre patrón Mayor (*Prunus dulcis* vs *Prunus persica*) y dispuestos a un marco de plantación de 7 m x 6 m. El riego fue por goteo a partir de un lateral de riego por hilera de árboles y seis emisores autocompensantes de 4 l h⁻¹ por árbol. El porcentaje de área humectada estuvo en torno al 25%.

El suelo, de textura franco-arcillo-limosa, presentó una densidad aparente de 1,4 g m⁻³, un contenido de agua útil de 0,18 m m⁻¹, un nivel de fósforo elevado (65 ppm) y bajo de materia orgánica (1,4%). El agua de riego tuvo una CE_{25°C} de 1,20 dS m⁻¹ y un contenido medio de cloruros y sodio de 2,95 y 2,86 meq l⁻¹, respectivamente.

Todos los árboles recibieron idénticos cuidados agrícolas, similares a los realizados en la zona. Las cantidades de N, P₂O₅ y K₂O aportadas con los

fertilizantes fueron 44,8 – 33,9 – 56,8 kg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. La poda se realizó anualmente durante el periodo invernal y se mantuvo la parcela libre de malas hierbas.

Los árboles se regaron al 110% ET_c al objeto de evitar condiciones limitantes de agua en el suelo. ET_c se determinó a partir de ET_o y los coeficientes de cultivo obtenidos en árboles de porte similar cultivados en lisímetros de drenaje en la misma plantación, durante los dos años anteriores. El riego se programó semanalmente con una frecuencia que varió de 1-2 veces al día en primavera-verano y 1-3 veces por semana en otoño.

El diseño estadístico fue de bloques al azar con tres repeticiones de 12 árboles cada una (3 hileras x 4 árboles).

Medidas

Las medidas se realizaron durante las fases II-III (crecimiento del fruto), IV (fase de llenado del grano) y V (postcosecha) del ciclo de desarrollo del almendro. Los datos meteorológicos horarios empleados procedieron de la estación agroclimática automática próxima a la parcela experimental (Apartado 3.2). DPV se calculó con frecuencia horaria usando datos de la temperatura del aire y la humedad relativa.

El contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v) se midió en tres tubos de acceso instalados en la zona de humectación del gotero bajo la copa (a 15 cm del emisor) y a lo largo de la línea portagoteros en tres árboles seleccionados al azar. A partir de los valores medios obtenidos se calculó el contenido relativo de agua extraíble (CRAE, apartado 3.2), siendo los valores de R_{\min} y R_{\max} alcanzados de 220 y 440 mm m⁻¹, respectivamente.

Ψ_t se midió cada 7-10 días con cámara de presión en tres hojas por repetición situadas cerca del tronco, en árboles equipados con sensores LVDT. La FDT se obtuvo a partir de 6 LVDT instalados en árboles seleccionados, dos por repetición.

El diámetro del tronco fue medido con cinta métrica en cada árbol testigo al final de la estación de crecimiento, con el que se obtuvo la STT. La producción y calidad de la almendra se determinó anualmente en los mismos árboles en que se

realizaron las medidas de la FDT y Ψ_t , de acuerdo con lo descrito en los apartados 3.4.6 y 3.4.8.

5.2.3. Análisis estadístico

Se realizaron análisis de regresión lineal y no lineal entre los indicadores del estado hídrico de la planta y las variables meteorológicas. La existencia o no de diferencias significativas entre las pendientes y las ordenadas en el origen de las regresiones lineales se determinó mediante análisis de covarianza. Los coeficientes de determinación (r^2) y el error cuadrado medio (MSE) se usaron para evaluar la bondad del ajuste entre las variables. Se usó el análisis de varianza (ANOVA) para discriminar el efecto del año en el tamaño del árbol, la producción y la carga de cosecha con paquete estadístico SPSS v. 15 para Windows (SPSS Inc., Chicago, USA).

5.3. Resultados

5.3.1. Ensayo en mandarino

El volumen de agua aplicado a los árboles en 2005-06 y 2006-07 fue de 651 y 821 mm, respectivamente (Fig. 5.1b). El incremento del 26% ocurrido en el segundo año fue debido al incremento de la CE en el agua de riego y por tanto a la necesidad de aplicar una fracción de lavado (Fig. 5.1b). ET_o y la precipitación promediaron valores anuales en torno a 1375 y 310 mm, respectivamente (Fig. 5.1a, c).

T_m presentó una tendencia similar durante los dos años estudiados (Fig. 5.1a), con valores que oscilaron entre los 8-11 °C en invierno y los 25-28 °C en verano. DPV_m y ET_o tuvieron un comportamiento similar a T_m , aunque con mayor variabilidad diaria (Fig. 5.1a).

Los valores medios de Ψ_m a 30 cm de profundidad oscilaron entre -5 y -21 cbar y a mayor profundidad se obtuvieron valores medios en torno a -36 cbar, mostrando condiciones no limitantes de agua en el suelo durante el periodo experimental (Fig. 5.1c).

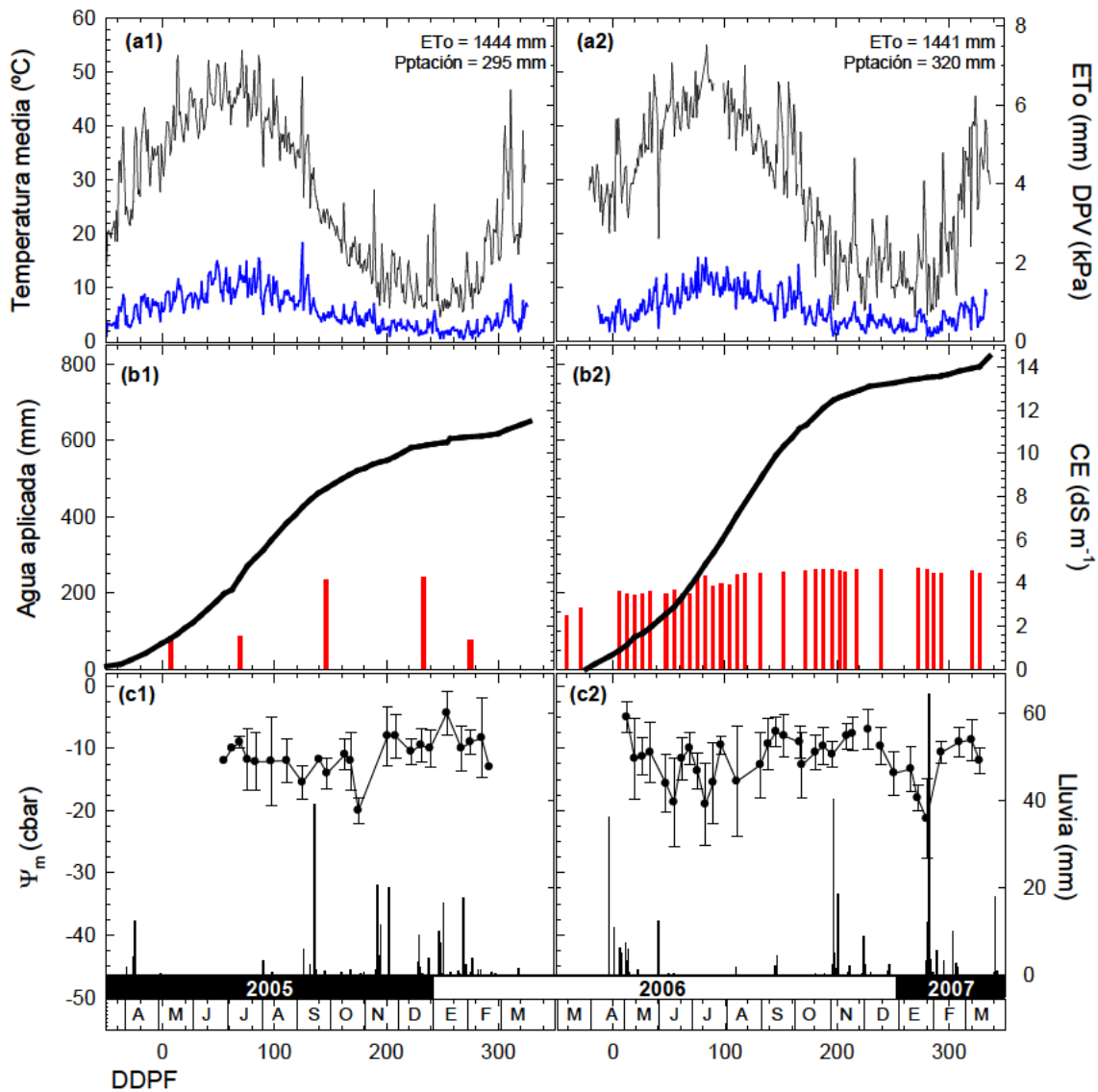


Figura 5.1. a. Evolución anual de la temperatura media diaria (—), evapotranspiración de referencia diaria, ETo (—) y déficit de presión de vapor medio diario, DPV_m (—); b. Volumen de agua de riego aplicado (—) y conductividad eléctrica (CE) del agua (—); c. Potencial matricial del agua en el suelo a 30 cm de profundidad (Ψ_m) (●) y precipitación (—), durante las campañas 2005-06 (1) y 2006-07 (2). Cada punto es la media de cuatro medidas. Las barras inferiores delimitan los años y los meses durante el periodo experimental.

Los diámetros máximos diarios de tronco y fruto presentaron un crecimiento sigmoideal muy similar (Bain, 1958), con una estrecha relación entre ellos, reflejado en un elevado coeficiente de determinación ($\text{MXTD} = 518,33 + 141,91\Phi - 0,98\Phi^2$, $r^2=0,99$, $P<0,001$). El crecimiento del fruto presentó un retraso de unos 58 días con respecto al del tronco (Fig. 5.2a). El crecimiento sigmoideal de los dos órganos permitió distinguir tres fases en cada uno de ellos (Fig. 5.2a), cuyo inicio y fin se delimitaron a partir de la integral térmica GDH. Así desde la máxima floración hasta

el final de la fase I del crecimiento del tronco, se acumularon 4549 y 5067 GDH °C para el primer y segundo año, respectivamente. El inicio de la fase III del tronco comenzó a principios del mes de octubre, una vez se acumularon unos 27500 GDH °C.

El crecimiento del tronco durante el segundo año fue un 29% inferior al primero (Fig. 5.2a), posiblemente debido a la elevada salinidad del agua de riego (Fig. 5.1b). A pesar de la fracción de lavado aplicada, hubo un incremento en la CE de la solución del suelo, que aumentó el contenido de sodio foliar en un 84% (capítulo 4, Tabla 4.5). La acumulación de sodio y cloruro en cítricos por la adición de NaCl en el agua de riego ha sido observada por otros autores (Bañuls and Primo-Millo, 1992; Gomez-Cadenas *et al.*, 1998; Romero-Aranda *et al.*, 1998; García-Sánchez *et al.*, 2005, 2006).

Ψ_t promedió -1,1 MPa durante las fases I y II del crecimiento del fruto en los dos años de estudio. Sin embargo en la fase III, este valor disminuyó a - 1,3 MPa, debido a que Ψ_t alcanzó valores por debajo de -2,0 MPa en los meses de invierno, coincidiendo con temperaturas nocturnas cercanas a 0 °C (Fig. 5.2d). MCD presentó un comportamiento estacional similar a las variables meteorológicas (Fig. 5.1a), registrando valores máximos (320 μm) en los meses de mayor demanda climática (Fig. 5.2c). Durante la fase II tanto MCD como TCD presentaron los valores más elevados, con promedios de 241 y 27 $\mu\text{m d}^{-1}$, respectivamente, siendo menores en las dos fases restantes (Fig. 5.2b, c).

Los árboles no crecieron significativamente durante el ensayo, tal y como muestran los valores de la sección transversal del tronco (Tabla 5.1) y los de TCD (Fig. 5.2c). TCD presentó valores medios de 32 y 22 $\mu\text{m d}^{-1}$ durante el primer y segundo año, respectivamente, lo que implicó una reducción del 32% en TCD durante el segundo año. Igualmente, la producción del segundo año se vio reducida en un 29% debido a una disminución del 50% en el nivel de cosecha (Tabla 5.1). Los hechos de ausencia de crecimiento significativo en STT y reducción de cosecha fueron atribuidos al aumento, durante la segunda campaña, de la salinidad del agua de riego (Romero-Aranda *et al.*, 1998; García-Sánchez *et al.*, 2005).

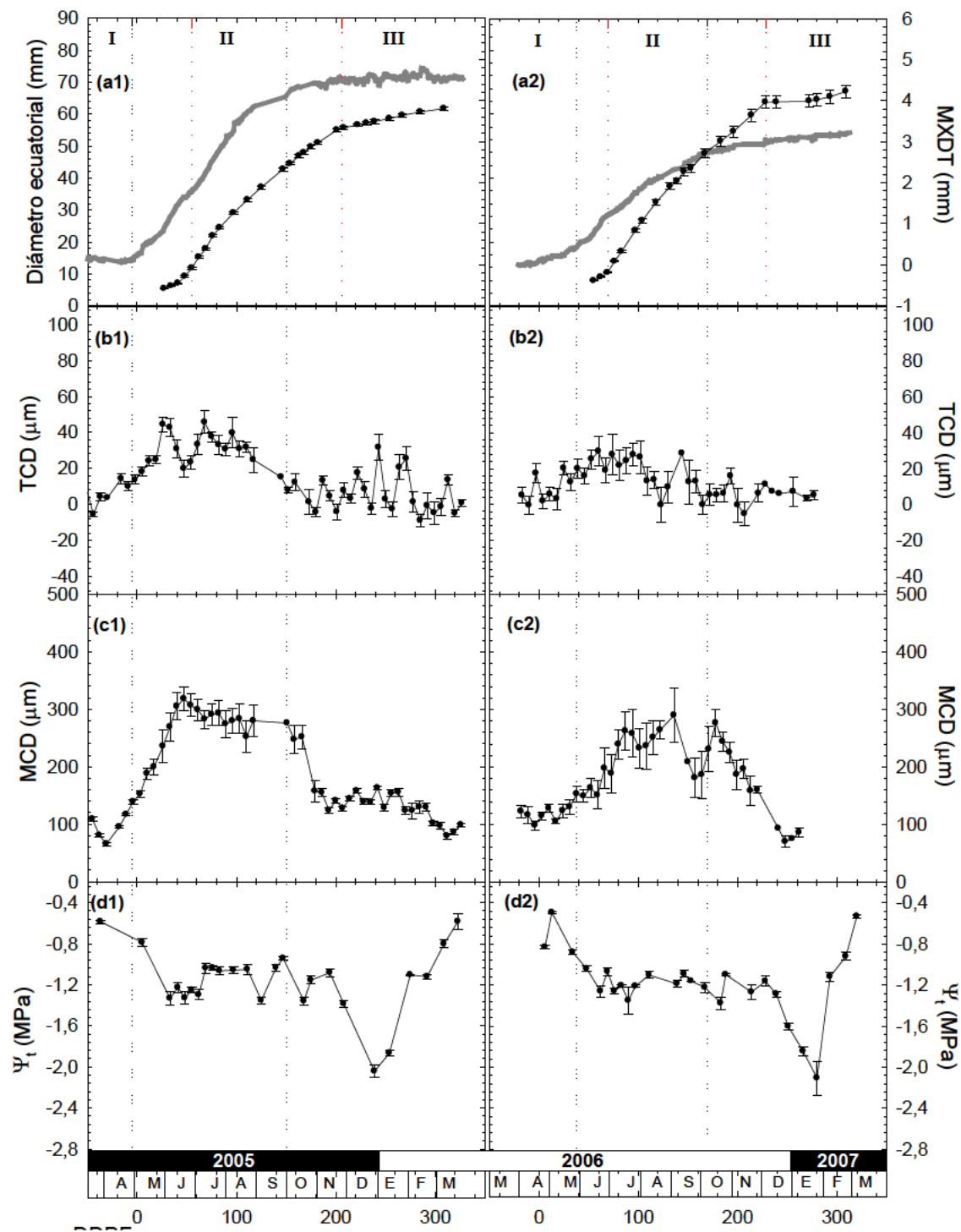


Figura 5.2. Evolución del diámetro máximo del tronco (—) y del diámetro del fruto (●). Cada punto es la media de 8 y 100 medidas para tronco y fruto, respectivamente. Las líneas verticales marcan las distintas fases fenológicas del crecimiento del fruto (—) y del tronco (—). (a). Evolución anual de la tasa de crecimiento diaria del tronco (TCD) (b) y de la máxima contracción diaria del tronco (MCD) a nivel semanal (c). Potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) (d), cada punto es la media de 8 medidas. Los números (1) y (2) hacen referencia a las campañas 2005-06 y 2006-07, respectivamente. Las barras inferiores delimitan los años y los meses del periodo experimental.

Tabla 5.1. Valores medios de la sección transversal del tronco (STT), producción, nivel y carga de cosecha durante 2005-06 y 2006-07.

Campaña	STT (cm ²)	Producción (kg árbol ⁻¹)	Nivel de cosecha (frutos árbol ⁻¹)	Carga de cosecha (frutos cm ⁻² STT)
2005-06	175,3	84,62	881	5,10
2006-07	185,9	59,94	445	2,45
Significación	ns	***	***	***

La última fila muestra diferencias significativas entre años según análisis de varianza. *** $P < 0,001$. ns: no significativo.

En la tabla 5.2 se muestran las correlaciones anuales de los indicadores del estado hídrico de la planta Ψ_t y MCD con las variables meteorológicas T, DPV, Rs y ETo, así como los parámetros estadísticos indicadores del grado de correlación de los mismos. MCD fue el indicador que mejores ajustes presentó, mostrando las mejores correlaciones con DPV y T, con coeficientes de determinación superiores a 0,45. En cambio los ajustes realizados con ETo y Rs mostraron los menores r^2 en los dos años de estudio (en torno a 0,40 y a 0,20 en 2005 y 2006, respectivamente). En el caso de Ψ_t los ajustes de segundo orden mejoraron los coeficientes de determinación obtenidos con las regresiones lineales ($r^2 < 0,10$), siendo T_m la variable que mejor coeficiente presentó (0,44 el primer año y 0,47 el segundo). TCD no estuvo significativamente correlacionado con ninguna variable en los dos años estudiados (datos no mostrados).

El estrecho rango de valores de MCD registrados en la fase III del crecimiento del tronco junto a la reducida actividad del tronco en este período (Fig. 5.2c), dio lugar a una ausencia de correlación entre este parámetro y cualquiera de las variables climáticas recogidas en esta fase. De esta manera el estudio de las líneas de referencia se centró en las fases I-II del crecimiento del tronco, lo que se tradujo en un importante incremento en los coeficientes de determinación y una disminución de MSE. Al igual que ocurrió en el estudio anual, MCD correlacionó mejor con DPV y T (Fig. 5.5 y 5.6) que con Rs y ETo, no superando coeficientes de determinación de 0,40 y 0,24 para estas dos últimas variables (Fig. 5.3 y 5.4).

Tabla 5.2. Ecuaciones de regresión anuales derivadas de los mejores ajustes de potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) y máxima contracción diaria del diámetro del tronco (MCD) con diferentes variables meteorológicas.

2005-06					2006-07			
Ψ_t (MPa)		r^2	n	MSE		r^2	n	MSE
ET _o (mm)	$y = -1,98 + 0,49x - 0,06x^2$	0,37***	25	0,0730	$y = -2,08 + 0,48x - 0,06x^2$	0,24 ^{ns}	25	0,1011
T_m (°C)	$y = -3,28 + 0,26x - 0,01x^2$	0,44***	25	0,0653	$y = -2,93 + 0,21x - 0,006x^2$	0,47***	25	0,0643
T_{mx} (°C)	$y = -4,07 + 0,27x - 0,01x^2$	0,37***	25	0,0720	$y = -4,20 + 0,23x - 0,004x^2$	0,38**	25	0,0756
T_{md} (°C)	$y = -3,73 + 0,22x - 0,004x^2$	0,23 ^{ns}	25	0,0892	$y = -3,76 + 0,21x - 0,004x^2$	0,33 ^{ns}	25	0,0814
DPV_m (kPa)	$y = -1,24 + 0,26x - 0,12x^2$	0,03 ^{ns}	25	0,1132	$y = -1,20 + 0,03x$	0,002 ^{ns}	25	0,1168
DPV_{mx} (kPa)	$y = -1,10 - 0,07x - 0,02x^2$	0,01 ^{ns}	25	0,1295	$y = -1,36 + 0,15x - 0,002x^2$	0,02 ^{ns}	25	0,1201
DPV_{md} (kPa)	$y = -1,23 + 0,04x$	0,01 ^{ns}	25	0,1222	$y = -1,21 + 0,02x$	0,004 ^{ns}	25	0,1388
R_s (W m ⁻²)	$y = -1,32 + 0,0007x$	0,04 ^{ns}	25	0,1070	$y = -1,36 + 0,0009x$	0,05 ^{ns}	25	0,1106
MCD (μm)								
ET _o (mm)	$y = 82,86 + 26,30x$	0,42***	317	3774	$y = 82,35 + 19,08x$	0,18 ^{ns}	210	4856
T_m (°C)	$y = 24,27 + 9,65x$	0,59***	317	2688	$y = -36,88 + 11,12x$	0,54***	210	2894
T_{mx} (°C)	$y = -39,71 + 8,73x$	0,61***	317	2560	$y = -122,92 + 10,52x$	0,60***	210	2550
T_{md} (°C)	$y = -22,97 + 8,71x$	0,63***	317	2407	$y = -72,13 + 9,63x$	0,47***	210	2368
DPV_m (kPa)	$y = 85,09 + 119,96x$	0,51***	317	3243	$y = 72,20 + 112,94x$	0,39***	210	3884
DPV_{mx} (kPa)	$y = 65,82 + 52,81x$	0,56***	317	2909	$y = 52,02 + 48,83x$	0,45***	210	3421
DPV_{md} (kPa)	$y = 75,17 + 59,26x$	0,57***	317	2852	$y = 59,38 + 54,41x$	0,45***	210	3404
R_s (W m ⁻²)	$y = 72,08 + 0,54x$	0,40***	317	3955	$y = 0,39x + 80,36$	0,18 ^{ns}	210	4771

r^2 = coeficiente de determinación, n = número de datos, ET_o = evapotranspiración del cultivo de referencia, R_s = radiación solar global diaria, T = temperatura diaria, DPV = déficit de presión de vapor diario, MSE = error cuadrado medio. Los subíndices m , mx y md indican media diaria, máxima diaria y media del periodo 10:00-15:00 hora solar, respectivamente. ^{ns}: no significativo. *** significativo a $P < 0,001$

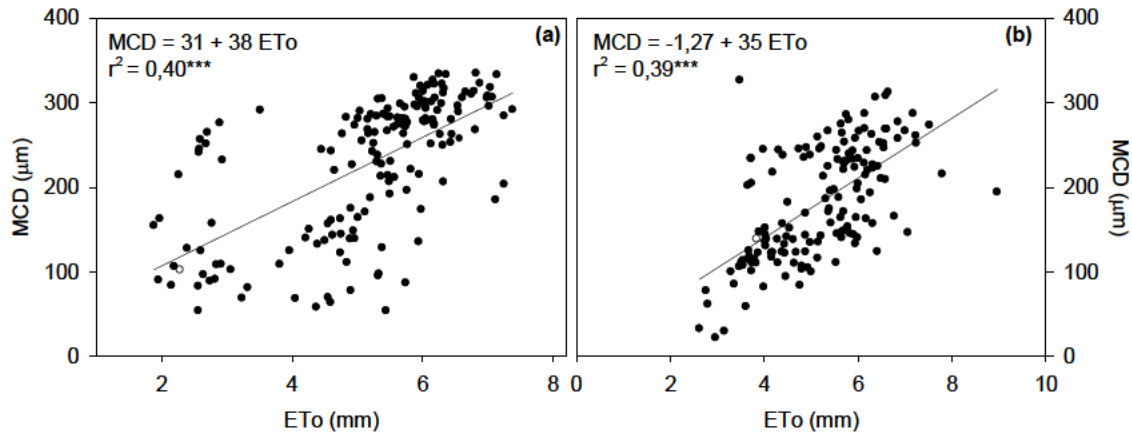


Figura 5.3. Relaciones entre MCD y ETo durante el periodo marzo-octubre (fases I y II) de 2005 (a) y 2006 (b). Cada punto es la media de 8 medidas. *** $P < 0,001$.

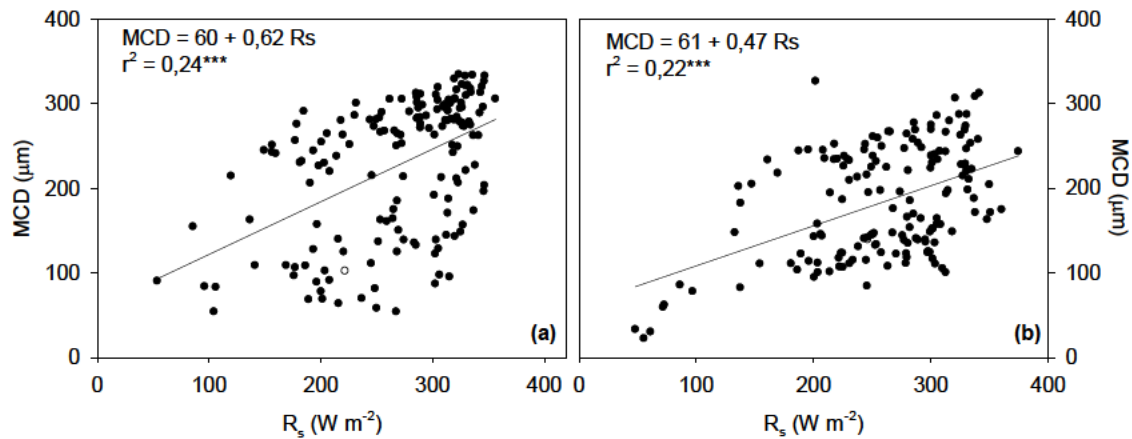


Figura 5.4. Relaciones entre MCD y R_s durante el periodo marzo-octubre (fases I y II) de 2005 (a) y 2006 (b). Cada punto es la media de 8 medidas. *** $P < 0,001$.

Con respecto a las regresiones MCD *vs* DPV y MCD *vs* T_m , fue la variable T_{md} con la que se obtuvo la mejor correlación ($r^2 = 0,81$) y los valores más bajos de MSE (935) (Fig. 5.5 y 5.6). El análisis de covarianza no detectó diferencias significativas interanuales entre las regresiones MCD *vs* DPV_{mx} ($P = 0,0901$) ni MCD *vs* DPV_{md} ($P = 0,1003$), a nivel de pendiente ni de ordenada en el origen. Por otro lado, ni en 2005 ni en 2006 se observaron diferencias entre las relaciones de MCD *vs* DPV_{mx} y MCD *vs* DPV_{md} ($P > 0,05$). Sin embargo, DPV_m presentó una pendiente significativamente superior, con un incremento de un 52 y 59% para 2005 y 2006 (Fig. 5.5).

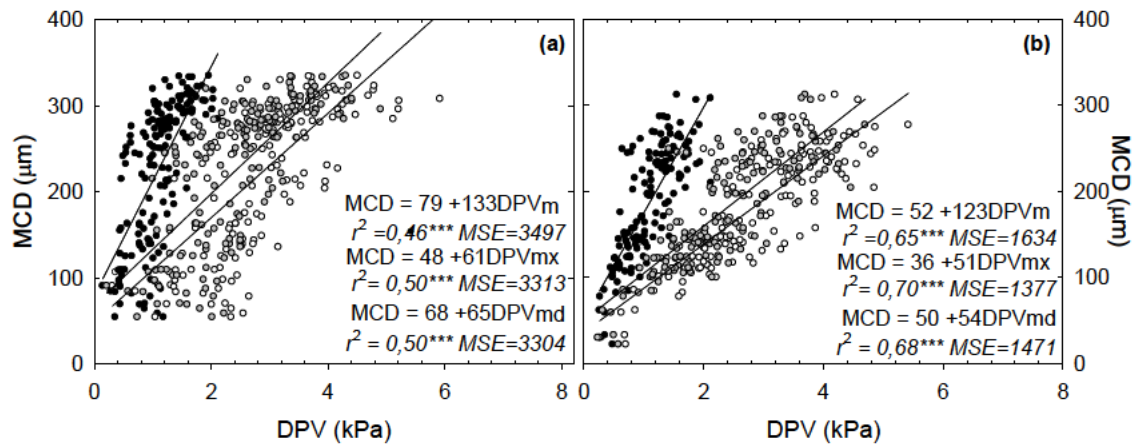


Figura 5.5. Relaciones entre MCD y DPV_m (●), DPV_{mx} (○) y DPV_{md} (◐) durante el periodo marzo-octubre (fases I y II) de 2005 (a) y 2006 (b). Cada punto es la media de 8 medidas. *** $P < 0,001$.

En general la correlación MCD *vs* T fue mejor que MCD *vs* DPV, alcanzándose $r^2 > 0,70$ en ambos años (Fig. 5.6). El análisis de la covarianza no detectó diferencias significativas interanuales ($P = 0,1102$) entre las pendientes y los términos independientes de las ecuaciones MCD *vs* T en sus variantes T_m , T_{mx} y T_{md} .

Hay que destacar la ausencia de diferencias significativas entre las líneas de regresión obtenidas en 2005 y 2006 para una variable climática dada, a pesar de la alta salinidad del agua de riego empleada en 2006.

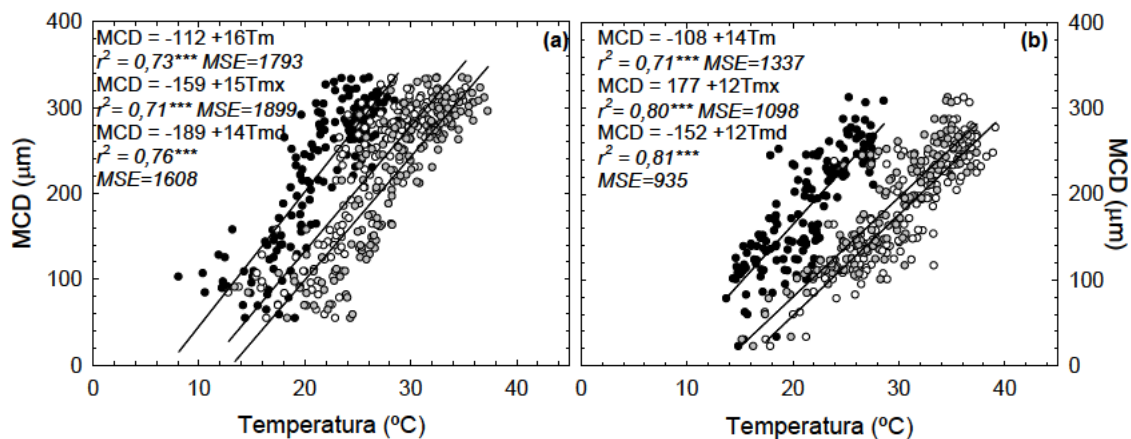


Figura 5.6. Relaciones entre MCD y T_m (●), T_{mx} (○) y T_{md} (◐) durante el periodo marzo-octubre (fases I y II) de 2005 (a) y 2006 (b). Cada punto es la media de 8 medidas. * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$.

La correlación anual entre MCD y Ψ_t presentó un bajo coeficiente de determinación ($r^2 = 0,26$), el que aumentó sustancialmente al realizar el ajuste por

fases (Fig. 5.7). Las correlaciones por fases fenológicas mostraron pendientes ($P = 0,7123$) y ordenadas en el origen ($P = 0,2352$) similares para el periodo que abarca las fases I y II y una pendiente sensiblemente inferior (75%) para la fase III, reflejando un comportamiento general de disminución de los valores de MCD para un mismo Ψ_t conforme avanza la estación (Fig. 5.7). Se observó una disminución en la pendiente de la correlación que abarcaba las fases I-II el segundo año respecto al primero, lo que podría achacarse al incremento de la salinidad en el riego.

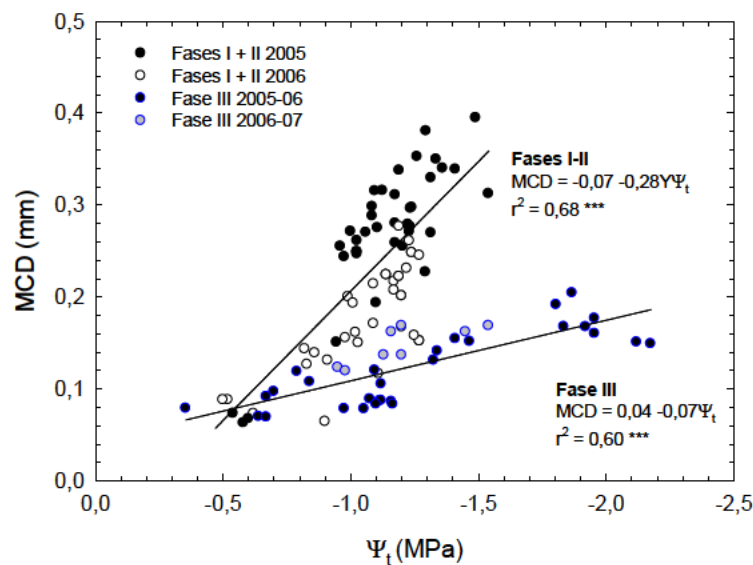


Figura 5.7. Relaciones entre la máxima contracción diaria (MCD) y el potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t). Las líneas de regresión engloban los datos de las dos campañas de estudio. Cada punto es la media de 8 medidas. *** $P < 0,001$

5.3.2. Ensayo en almendro

Los volúmenes de agua aplicados fueron 723 mm y 619 mm en 2006 y 2007 respectivamente, y los valores medios de ETo y precipitación anual 1250 y 340 mm, respectivamente (Fig. 5.8a, b).

T_m presentó una tendencia similar durante los dos años (Fig. 5.8a), con valores mínimos de 8-10 °C en invierno y valores máximos de 27-28 °C en verano. El comportamiento estacional de DPV_m fue similar al de T_m , aunque con mayor variabilidad entre días (Fig. 5.8a).

La programación del riego mantuvo contenidos relativos de agua extraíble (CRAE) próximos a la unidad (valores medios de 0,98 y 0,96 en 2006 y 2007, respectivamente) durante el periodo de estudio (Fig. 5.8b). Ψ_t promedió -0,91 y

-0,90 MPa en 2006 y 2007, respectivamente (Fig. 5.8c), alcanzando el valor máximo ($\approx -0,6$ MPa) en los periodos de baja demanda (fases fenológicas II-III y V), y valores mínimos ($\approx -1,2$ MPa) en los de alta demanda (fase IV). La MCD presentó un comportamiento estacional similar al de DPV_m (Fig. 5.8d), alcanzando los mayores valores durante la fase IV (valores medios de 463 y 360 μm en 2006 y 2007, respectivamente). Durante la fase IV de 2006, periodo de llenado del grano, los valores TCD disminuyeron respecto a los alcanzados en las fases II-III y principios de la V. Mientras que en 2007 fueron más estables durante toda la estación de crecimiento e inferiores a los del año anterior (Fig. 5.8e). Sin embargo, estos valores fueron lo suficientemente importantes como para generar un incremento significativo de STT (Tabla 5.3). A nivel productivo, no hubo diferencias entre 2006 y 2007 en ninguno de los tres parámetros evaluados: producción, nivel de cosecha y carga de cosecha (Tabla 5.3).

Tabla 5.3. Valores medios de la sección transversal del tronco (STT), producción, nivel y carga de cosecha durante 2006 y 2007.

Año	STT (cm ²)	Producción pepita (kg árbol ⁻¹)	Nivel de cosecha (frutos árbol ⁻¹)	Carga de cosecha (frutos cm ⁻² de STT)
2006	234,81	7,97	5.283	22,60
2007	277,19	8,37	6.407	23,24
Significación	*	ns	ns	ns

La última fila muestra diferencias significativas entre años según análisis de varianza. * $P < 0,05$. ns: no significativo.

En la tabla 5.4 se muestran las correlaciones anuales de los indicadores del estado hídrico de la planta MCD y TCD con las variables meteorológicas T, DPV, Rs y ETo, así como los parámetros estadísticos indicadores del grado de correlación de los mismos. Mientras que MCD presentó altas correlaciones con la generalidad de las citadas variables, TCD fue totalmente independiente (Tabla 5.4). El orden de correlación encontrada entre MCD y las variable meteorológica fue: $DPV_{md} > DPV_m > ETo > T_{md} > Rs > T_m$ (Tabla 5.4).

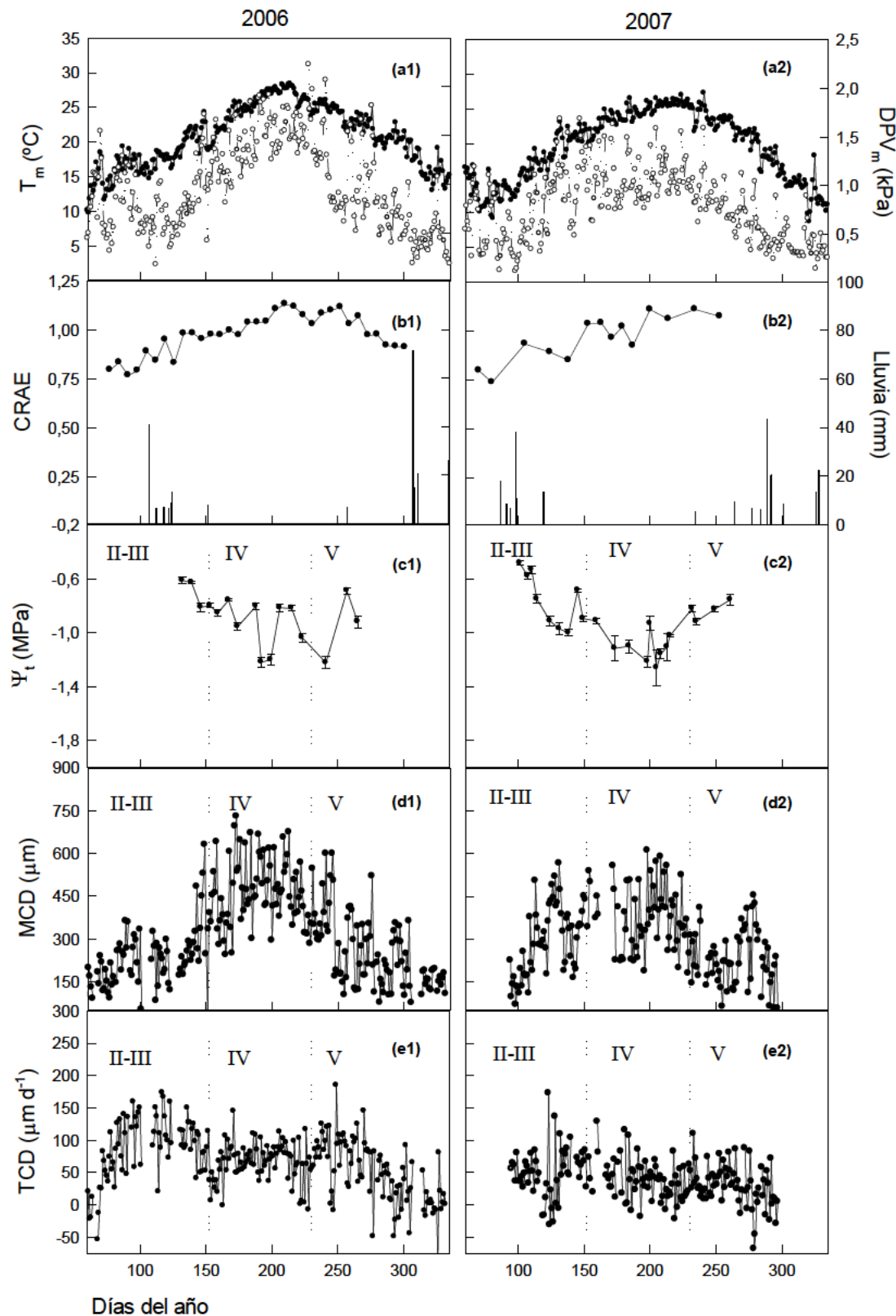


Figura 5.8. Evolución estacional de la temperatura (T_m ; ●), y déficit de presión de vapor (DPV_m ; ○) medios diarios (a); lluvia y contenido relativo de agua extraíble (CRAE) (b); potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) (c); máxima contracción diaria de tronco (MCD) (d); tasa de crecimiento diario de tronco (TCD) (e) durante 2006 (1) y 2007 (2). Las líneas verticales en c-e delimitan las fases fenológicas.

Tabla 5.4. Parámetros de las ecuaciones de primer orden ($y = ax + b$) para la máxima contracción diaria del tronco (MCD) y la tasa de crecimiento diaria del tronco (TCD) y las variables climáticas seleccionadas. Periodo 2006 – 2007.

	Año	MCD (μm)				MSE	TCD ($\mu\text{m d}^{-1}$)			
		a	b	r^2	n		a	b	r^2	n
ET _o (mm d ⁻¹)	2006	85,40	-63,93	0,64***	194	8389	0,28	71,43	0,00 ^{ns}	194
	2007	67,48	12,76	0,48***	183	7530	2,66	26,71	0,01 ^{ns}	183
R _s (MJ m ⁻² d ⁻¹)	2006	19,28	-84,06	0,53***	194	11039	0,73	56,71	0,01 ^{ns}	194
	2007	13,75	9,80	0,53***	183	7332	0,04	37,44	0,00 ^{ns}	183
T _m (° C)	2006	29,53	-328,85	0,41***	194	13887	-1,80	113,89	0,02 ^{ns}	194
	2007	15,11	-23,85	0,18***	183	14037	-0,65	52,31	0,00 ^{ns}	183
T _{md} (° C)	2006	31,56	-526,26	0,67***	194	7844	-1,22	106,30	0,01 ^{ns}	194
	2007	19,50	-185,35	0,36***	183	11371	-1,00	63,25	0,01 ^{ns}	183
DPV _m (kPa)	2006	302,98	-1,28	0,72***	194	6667	-13,43	87,86	0,02 ^{ns}	194
	2007	304,49	34,50	0,59***	183	6994	3,24	35,33	0,01 ^{ns}	183
DPV _{md} (kPa)	2006	173,13	-24,32	0,85***	194	3551	-5,57	84,43	0,01 ^{ns}	194
	2007	162,56	17,99	0,75***	183	4157	-4,96	45,57	0,01 ^{ns}	183

r^2 = coeficiente de determinación, n = número de datos, ET_o = evapotranspiración del cultivo de referencia, R_s = radiación solar global diaria, T = temperatura diaria, DPV = déficit de presión de vapor diario, MSE = error cuadrado medio. Los subíndices *m* y *md* indican media diaria y media del periodo 10:00-15:00 hora solar, respectivamente. ^{ns} no significativo. *** significativo a P < 0,001

El hecho de que la mejor correlación encontrada fuese con DPV_{md} indica que en almendro MCD es altamente dependiente de las condiciones climáticas predominantes en las horas más demandantes del día. La fuerte influencia de este periodo en los valores diarios de DPV explica que MCD estuviera también bien correlacionado con DPV_m .

Tabla 5.5. Pendiente, coeficiente de determinación (r^2) y número de datos (n) de las regresiones lineales ($y = ax$) entre la máxima contracción diaria de diámetro de tronco (MCD) y el déficit de presión de vapor, promediado para el periodo 10:00-15:00 hora solar (DPV_{md}), para las diferentes fases fenológicas, en 2006 y 2007.

Año		Fases fenológicas			Todo el periodo
		II-III	IV	V	
2006	Pendiente	164,29a	170,27a	145,27b	163.07 a
	r^2	0,86***	0,74***	0,75***	0,85***
	n	47	78	69	194
	MSE	1689	3574	3412	3610
2007	Pendiente	179.04 a	172.86 a	156.42 b	171.53 a
	r^2	0,75***	0,68***	0,64***	0,74***
	n	60	69	54	183
	MSE	4102	4336	3471	4177
Significación		*	ns	ns	*

Diferentes letras en una fila indican diferencias significativas entre periodos fenológicos de acuerdo al test de rango múltiple de Duncan ($P < 0,05$). La última fila muestra diferencias significativas entre los valores de la pendiente de la misma columna según análisis de varianza ($P < 0,05$). ns: no significativo. * $P < 0,05$. *** $P < 0,001$

Con el objetivo de evaluar la estabilidad de las relaciones MCD *vs* DPV_{md} y simplificar el modelo de predicción de MCD se forzó a las rectas de regresión a pasar por el origen de coordenadas (Tabla 5.5). Este procedimiento se vio justificado al no modificarse la bondad del ajuste (Tablas 5.4 y 5.5) y porque la contracción del tronco es un proceso gobernado principalmente por fuerzas derivadas de la transpiración. Por tanto, MCD debería ser cero o prácticamente cero en ausencia de demanda evaporativa (Cermák *et al.*, 2007). MCD y DPV_{md} estuvieron fuertemente correlacionados en cada una las fases fenológicas consideradas (Fig. 5.9 a-c), así como para toda la estación de crecimiento (Fig. 5.9d). El análisis de covarianza indicó que las pendientes obtenidas para el periodo de postcosecha (fase V) fueron significativamente menores que aquellas obtenidas para las otras fases (Tabla 5.5), con una reducción del 13 y 11% en 2006 y 2007,

respectivamente. No se observaron diferencias significativas entre las fases II-III y IV o entre estas fases y los valores correspondientes a toda la estación durante los dos años de estudio. Así mismo, el análisis indicó que la edad del árbol influyó en la relación MCD *vs* DPV_{md} (Tabla 5.5), ya que su pendiente se incrementó significativamente un 5% de 2006 a 2007.

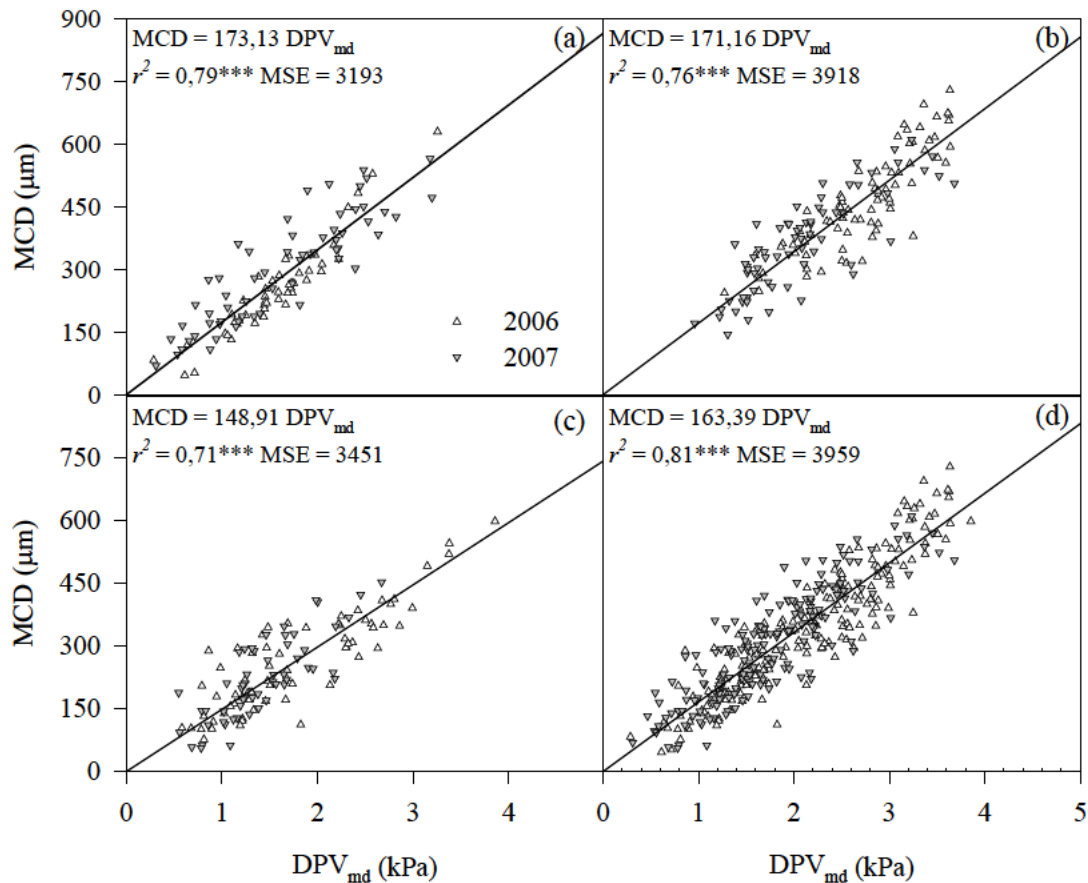


Figura 5.9. Relación entre la máxima contracción diaria del diámetro del tronco (MCD) y el déficit de presión de vapor, promedio del periodo de las 10:00-15:00 (DPV_{md}), para las fases fenológicas II-III (a), IV (b), V (c) y todo el periodo (d). Las líneas muestran las regresiones lineales para todos los puntos de 2006 y 2007. Cada punto es la media de 6 medidas. *** $P < 0,001$.

MCD presentó una fuerte relación lineal con Ψ_t cuando se agruparon todas las medidas correspondientes al periodo 2006-2007 (Fig. 5.10d). Como el análisis de covarianza reveló que las pendientes y las ordenadas en el origen de la relación MCD *vs* Ψ_t no variaron ($P > 0,05$) entre años, se usó una única ecuación lineal para describir la relación entre MCD *vs* Ψ_t a escala anual. Los análisis de estabilidad

estacional indicaron que las pendientes fueron similares ($P > 0,05$) para todos los periodos, mientras que las ordenadas en el origen en los periodos postcosecha fueron significativamente menores (Fig 5.10).

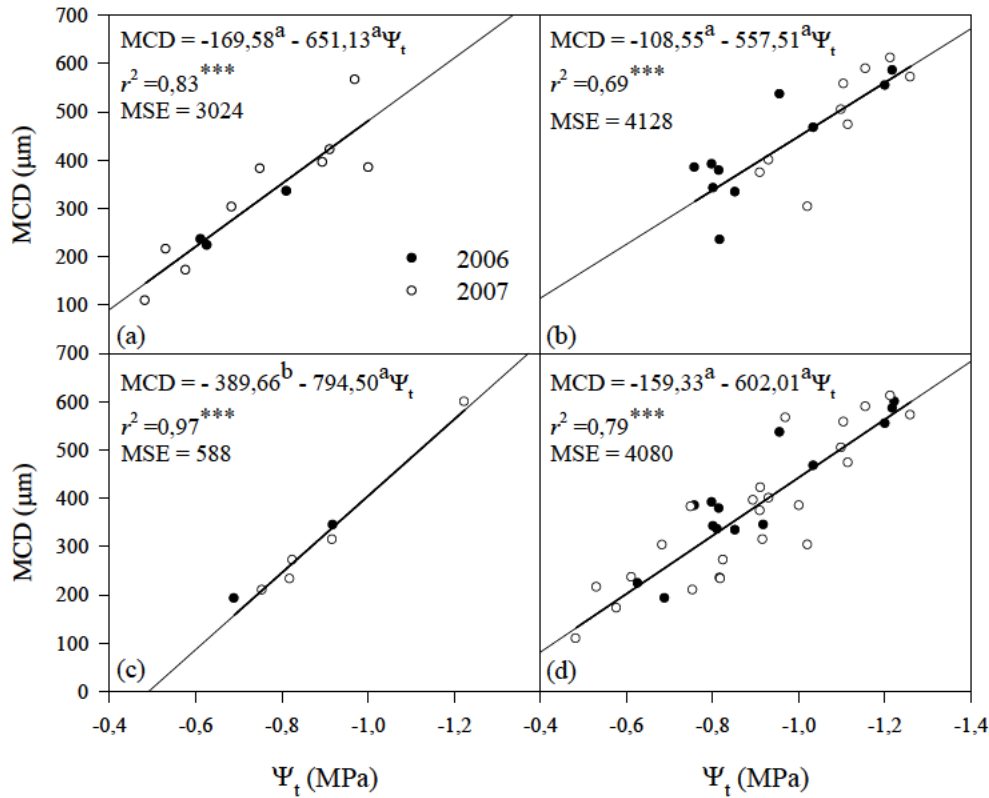


Figura 5.10. Relación entre la máxima contracción diaria del diámetro del tronco (MCD) y potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) para las fases II-III (a), fase IV (b), postcosecha (c) y toda la estación (d). Las líneas de regresión engloban los datos del periodo 2006 - 2007. Las ordenadas en el origen seguidos por diferentes letras indican diferencias significativas entre ellos ($P < 0,05$). Pendientes seguidas de diferentes letras indican diferencias significativas entre ellas ($P < 0,05$). Cada punto es la media de 6 medidas. *** $P < 0,001$.

DPV_m y DPV_{md} fueron las variables climáticas más estrechamente relacionadas con Ψ_t (análisis no mostrados). La relación entre Ψ_t y DPV_m fue la misma a través del año, ya que la regresión lineal obtenida para los periodos precosecha y postcosecha (Fig 5.11) mostraron pendientes ($P = 0,1307$) y ordenadas ($P = 0,2093$) similares. Los análisis de covarianza indican que la relación entre estas variables no fue anual-dependiente.

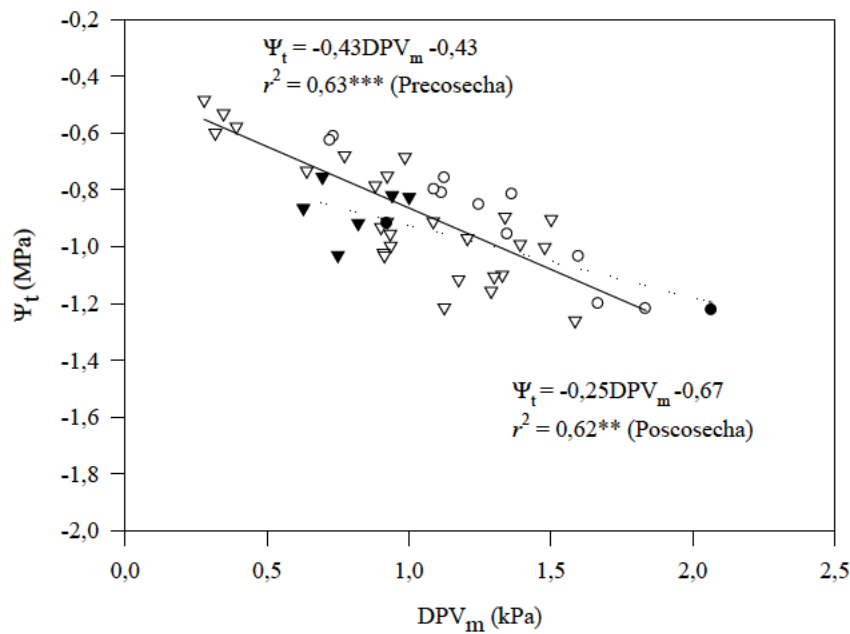


Figura 5.11. Relación entre el potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) y el déficit de presión de vapor medio diario (DPV_m). Las medidas corresponden a 2006 (círculos) y 2007 (triángulos). Cada punto es la media de 6 medidas. Las líneas continua y discontinua punteada corresponden a las regresiones lineales del periodo precosecha (símbolos blancos) y postcosecha (símbolos negros), respectivamente. ** $P < 0,01$, *** $P < 0,001$.

5.4. Discusión

El régimen de riego aplicado durante el periodo de estudio permitió mantener condiciones no limitantes de agua en el suelo en ambos ensayos tal y como indicaron los valores de Ψ_m que se mantuvieron entre -5 y -21 cbar en mandarino (Fig. 5.1c), y los de CRAE que estuvieron próximos a la unidad en almendro (Fig. 5.8b). Además Ψ_t promedió valores correspondientes a árboles no estresados (Fig. 5.2d; 5.8c). Estos valores fueron muy similares a los indicados en cítricos por Vélez *et al.* (2007) y Pérez-Pérez *et al.* (2009) y almendro por Shackel *et al.* (1997) y Fereres y Goldhamer (2003) para árboles bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo.

TCD mostró coeficientes de correlación no significativos e inferiores a los de MCD cuando se relacionaron con las variables meteorológicas (Tablas 5.4), demostrando que TCD en árboles adultos y bien regados depende principalmente de otros factores, tales como la fase fenológica en la que se encuentre el cultivo

(Cuevas *et al.*, 2010; Ortuño *et al.*, 2010; Fig 5.2b; 5.8e) o la disponibilidad de carbono (Daudet *et al.*, 2005). Sin embargo, existe un número importante de trabajos que presentan a TCD como un indicador fiable del estado hídrico de árboles jóvenes (Goldhamer y Fereres, 2001; Moriana y Fereres, 2002; Nortes *et al.*, 2005), mientras que su robustez disminuye en árboles productivos (Intrigliolo y Castel, 2004). Nuestros resultados, en consonancia con lo anterior, revelan la poca consistencia de TCD para establecer líneas base de referencia para la programación del riego de plantaciones de mandarinos y almendros en producción.

La alta correlación encontrada, en las dos especies frutales estudiadas, entre MCD y las variables climáticas pone de manifiesto el carácter robusto y fiable de MCD para indicar cambios del estado hídrico en plantaciones frutales adultas, sin condiciones limitantes de agua en el suelo, en respuesta a las variaciones de la demanda climática (Fernández y Cuevas, 2010; Ortuño *et al.*, 2010; Tabla 5.2, 5.4). Estos resultados están en consonancia con observaciones previas en almendros (Fereres y Goldhamer, 2003) y otras especies frutales (Intrigliolo y Castel, 2006; Moreno *et al.*, 2006; Ortuño *et al.*, 2009a). Según Cermák *et al.* (2007) son los procesos de vaciado y llenado de los tejidos de almacenamiento de agua del árbol los causantes de los cambios diurnos en el volumen del tronco, los que ocurren incluso en plantas bien regadas (Zweifel *et al.*, 2001). Esto es debido a la resistencia hidráulica que ofrecen los elementos conductores (Meinzer *et al.*, 2001), y que determina la magnitud de la contracción del tronco, junto con los factores ambientales y fisiológicos (Parlange *et al.*, 1975; Génard *et al.*, 2001).

Las variables relacionadas con DPV fueron las mejores predictoras de MCD en el caso del almendro (Tabla 5.4). Resultados similares se encontraron en almendro (Fereres y Goldhamer, 2003), olivo (Moreno *et al.*, 2006), ciruelo (Intrigliolo y Castel, 2006) y melocotonero (Conejero *et al.*, 2007a). En mandarino, sin embargo, aunque se consiguieron buenas correlaciones con DPV fueron mejores con T; lo que concuerda con lo observado en cítricos por otros autores (Ortuño *et al.*, 2006b, Vélez *et al.*, 2007; Ortuño *et al.*, 2009a, b). Este comportamiento diferente podría asociarse a la fuerte regulación estomática que presentan los cítricos bajo condiciones de elevado DPV (Syvertsen y Salyani, 1991), lo que reduciría la

transpiración y por tanto las contracciones de tronco, explicando así la menor relación entre MCD y DPV en este cultivo. Al contrario que los cítricos, el almendro (Higgins *et al.*, 1992) y el olivo (Giorio *et al.*, 1999) presentan menor sensibilidad estomática a DPV, lo que explicaría la estrecha relación observada entre MCD y DPV en ambas especies. Si bien, hay autores que han encontrado buenas correlaciones MCD *vs* T en olivo (Moreno *et al.*, 2006; Cuevas *et al.*, 2010).

En almendro, la correlación entre MCD y DPV_m mejoró significativamente cuando se consideró DPV_{md} (Tabla 5.4), en contraste con lo observado por Fereres y Goldhamer (2003). Lo mismo ocurrió en mandarino, cuando se consideraron DPV_{md} y T_{md}. Estos resultados indican que MCD fue principalmente dependiente de las condiciones climáticas reinantes en las horas más demandantes del día. El fuerte peso de este periodo en los valores diarios explica que MCD también estuviera bien correlacionada con DPV_m y también con T_m en mandarino.

Con el objetivo de evaluar la estabilidad de las líneas de referencia a corto plazo se estudiaron las correlaciones entre MCD y las variables climáticas por fases fenológicas (Jones, 2004; Doltra *et al.*, 2007). En mandarino se comprobó ausencia de correlación durante la fase III, lo que coincidió con una pendiente sensiblemente menor a la correspondiente a las fases I y II en la correlación MCD *vs* Ψ_t (Fig. 5.7). En almendro, también se dieron diferencias en el comportamiento estacional de la relación MCD *vs* DPV_{md}, ya que la pendiente disminuyó significativamente durante el periodo postcosecha (Tabla 5.9). Este comportamiento de histéresis también ha sido citado en olivos, ciruelos y melocotoneros bien hidratados (Moriana y Fereres, 2004; Intrigliolo y Castel, 2006; Conejero *et al.*, 2007a). Para un valor de DPV_{md} dado, la MCD en postcosecha fue en torno a un 11-14% menor que el valor correspondiente al periodo de crecimiento del fruto (Tabla 5.5). Las hipótesis que pueden explicar este comportamiento en mayor o menor medida son:

- (1) Menores tasas de transpiración postcosecha como resultado de la disminución de la conductancia estomática tras la recogida de frutos (DeJong, 1986) o como resultado de cambios ontogénicos que ocurren en las hojas (Castel y Fereres, 1982; Conejero *et al.*, 2007a; Nortes *et al.*, 2009). En árboles bien hidratados, una disminución en la transpiración debería llevar a

mayores Ψ_t (Cermák *et al.*, 2007), dado que en el mandarino ocurre lo contrario en la fase III (Fig. 5.2d), esta hipótesis no explica la ausencia de correlación entre MCD y las variables climáticas ni la disminución en la pendiente de la relación MCD *vs* Ψ_t . En el almendro mayores potenciales hídricos conllevarían cambios en la relación Ψ_t *vs* DPV_m durante la estación. Dado que esto no fue observado en nuestro ensayo (Fig. 5.11), parece que la hipótesis (1) no explica el comportamiento de histéresis de la relación MCD *vs* DPV_{md} .

- (2) Cambios en el módulo de elasticidad o en la conductividad hidráulica radial de los tejidos de la corteza conforme avanza la estación (Gènard *et al.*, 2001; Léchaudel *et al.*, 2007; Cuevas *et al.*, 2010). Una reducción en la elasticidad del tejido sería explicada por la disminución de la pendiente de la relación entre MCD y Ψ_t conforme avanza la estación (Intrigliolo y Castel, 2004; De Swaef *et al.*, 2009), lo que coincide con lo observado en el ensayo realizado en mandarino (Fig. 5.7), por lo que la hipótesis (2) podría ser una explicación a la ausencia de correlación entre MCD y las variables climáticas observadas en la fase III. En uva, Intrigliolo y Castel (2007) observaron que después del envero no existe relación entre el estado hídrico de la planta y los parámetros derivados de las medidas FDT. Esto se debió a la alta competencia por fotoasimilados entre el fruto y el crecimiento vegetativo en este periodo, en detrimento del último y la disminución de la elasticidad de los tejidos del tronco causando la disminución en los valores MCD (Tyree y Jarvis, 1982; Intrigliolo y Castel, 2004). En el caso del mandarino tardío, ocurre algo similar: el tronco deja de crecer cuando lo hace el fruto y éste se convierte en el principal sumidero de fotoasimilados. En el almendro, la pendiente de esta relación no varió durante la estación (Fig. 5.10), sugiriendo que la hipótesis (2) no explica el cambio en la relación MCD *vs* DPV_{md} en el periodo postcosecha.
- (3) El papel que juega la ausencia de frutos en el balance de carbono (Grossman y DeJong, 1994). En las especies del género *Prunus*, la concentración de azúcar en los tejidos de madera es generalmente mayor durante el periodo

postcosecha debido a la ausencia de frutos como sumideros (Flore y Layne, 1997). Esto puede llevar a un menor potencial osmótico en los tejidos del floema y a continuación a un menor gradiente de potencial hídrico entre el xilema y el floema, y, a su vez, a menores contracciones del tronco para un potencial hídrico de tallo dado (Cochard *et al.*, 2001; Intrigliolo y Castel, 2007). Esto significa que la hipótesis (3) es una explicación plausible para la disminución de la sensibilidad de MCD a DPV en el periodo postcosecha, lo que es soportado por la menor ordenada en el origen de la relación lineal entre MCD y Ψ_t durante postcosecha (Fig. 5.10) (Cochard *et al.*, 2001). Hay que señalar que Intrigliolo y Castel (2006; 2007) afirman que fue más bien la pendiente que la ordenada de la relación Ψ_t - MCD la que estuvo afectada por la fase fenológica y la carga de cosecha. Moriana y Fereres (2004) también encontraron que la presencia de frutos conduce a un comportamiento de histéresis de la relación MCD *vs* DPV en olivos adultos, aunque lo atribuyen a un incremento en las tasas de transpiración debido a la presencia de frutos.

En mandarino, el análisis de covarianza a nivel interanual no indicó diferencias significativas entre las líneas de referencia MCD *vs* DPV ni MCD *vs* T. Ausencia de diferencias a la que podría haber contribuido la capacidad de los cítricos para realizar ajuste osmótico en condiciones de estrés salino (Walker *et al.*, 1983, 1993; Behboudian *et al.*, 1986; Lloyd *et al.*, 1987a, b, 1989, 1990; Bañuls y Primo-Millo, 1992; Maas, 1993; Gómez-Cadenas *et al.*, 1998; Pérez-Pérez, 2005). La diferencia de carga productiva entre los dos años tampoco influyó en el comportamiento de la MCD y por tanto en las líneas de referencia obtenidas, lo que coincide con lo observado en limonero por Ortuño *et al.* (2009a). Sin embargo, otros autores encontraron en olivo y ciruelo una dependencia de la carga de cosecha sobre el comportamiento de MCD (Moriana y Fereres, 2004; Intrigliolo y Castel, 2007; Puerto *et al.*, 2010).

En almendro, de forma distinta a lo observado en mandarino, sí se encontraron diferencias interanuales en la relación entre MCD *vs* DPV_{md} (Tabla 5.5), lo que puede atribuirse al incremento anual en el tamaño del tronco y del árbol

en general (Tabla 5.3; Intrigliolo y Castel, 2006), ya que la carga de cosecha fue similar en 2006 y 2007 (Tabla 5.3). A pesar de la tendencia observada hacia mayores valores de MCD con el incremento del tamaño del árbol para una demanda evaporativa determinada (Tabla 5.5), la bondad del ajuste de la relación MCD ν DPV_{md} que engloba ambos años fue similar a las obtenidas de forma anual (Fig. 5.9; Tabla 5.5), ya que suele ser en árboles más pequeños a los empleados en este estudio cuando el efecto del tamaño del tronco sobre FDT es más importante (Intrigliolo y Castel, 2006). Además, la evidencia del efecto relativamente pequeño del tamaño del árbol en FDT, bajo nuestras condiciones experimentales, es el hecho de que la relación MCD ν Ψ_t no estuvo afectada por el año (Fig. 5.10). La estrecha correlación MCD ν Ψ_t en base a toda la estación de riego (Fig. 5.10d) contrasta con lo observado previamente en almendros jóvenes bien regados por Fereres y Goldhamer (2003), sugiriendo que el comportamiento de histéresis de la relación MCD ν Ψ_t disminuye con la edad de los almendros.

Es de destacar el hecho de que la relación MCD ν DPV_{md} obtenida en almendro durante las primeras fases (II-III) no difiere estadísticamente de la anual en ninguno de los dos años (Tabla 5.5). Esto es particularmente importante si se tiene en consideración que factores como el método de riego, material vegetal, tamaño del árbol o carga de cosecha (Fereres y Goldhamer, 2003; Intrigliolo y Castel, 2006, 2007) representan las mayores limitaciones para transferir las líneas de referencia derivadas de un estudio en concreto a otros lugares. Además, la naturaleza dinámica de los huertos de frutales podría implicar alternancia productiva y variación en el tamaño del árbol y carga de cosecha, así como limitar la vida útil de la línea de referencia, incluso en el huerto donde ésta fue determinada.

Desde un punto de vista práctico, los resultados obtenidos sugieren que la línea de referencia obtenida durante las primeras fases (II-III) podría ser útil para programar el riego en almendros durante el resto de la estación. La mayoría de las estrategias de riego deficitario controlado (RDC) que han sido aplicadas satisfactoriamente en almendro se basan en ahorrar agua durante la fase de llenado de grano o fase IV (Girona *et al.*, 2005a), y en menor medida en postcosecha (Romero *et al.*, 2004). Este enfoque parece muy útil para la programación del riego

del almendro ya que prescinde de la determinación de ecuaciones de referencia específicas para ajustar carga productiva o tamaño del árbol, puesto que la línea base obtenida durante las fases II-III es válida para el resto de la estación. Además, si se tiene en cuenta que durante las fases II-III se suele satisfacer el 100% ETc de almendros en RDC la necesidad de contar con árboles control para la elaboración de las líneas de referencia desaparece, lo que resulta muy ventajoso.

5.5. Conclusiones

Del estudio realizado destaca la idoneidad de MCD para establecer líneas de referencia para la programación del riego en mandarino y almendro debido a su respuesta lineal y buena correlación con la temperatura y a la demanda evaporativa, respectivamente.

En mandarino, la mejor correlación se obtuvo entre MCD y T_{md} , si bien, al no haber diferencias significativas con las correlaciones obtenidas con las otras variables de T , se recomienda el empleo de T_m o T_{mx} por la simplicidad en su obtención. Los resultados muestran la conveniencia de emplear la línea de referencia resultante del período marzo-octubre, que abarca las dos primeras fases del crecimiento del tronco, en la programación de riego de mandarinos adultos cv. Fortune. Este periodo además de comprender el momento de máximas necesidades hídricas del mandarino, supone el 80 % de los requerimientos hídricos necesarios para toda la estación de riego. A pesar del incremento de salinidad en el agua de riego y la variación significativa de la carga de cosecha no se observaron diferencias interanuales en las líneas de referencia obtenidas, si bien sería necesario confirmar la ausencia de influencia de la salinidad a más largo plazo.

Entre las variables de déficit de presión de vapor, DPV_{md} fue la que mejor predijo MCD en el caso de los almendros. Se demostró que la suave histéresis de la relación MCD *vs* DPV_{md} no afectó significativamente su poder predictivo, y que una línea base, independiente del estado fenológico, puede ser útil para la programación del riego en almendros. Como procedimiento práctico, se propone determinar la línea base periódicamente (cada 1 ó 2 años) durante las primeras fases (II-III) del ciclo fenológico del almendro y de este modo obtener MCD de referencia para las

siguientes fases de crecimiento. De esta manera, se evitarían los cambios que diversos factores pueden ejercer sobre la estabilidad de la línea base con el paso del tiempo, como es el caso del crecimiento del diámetro de tronco.

**6. Programación del riego en almendro a partir de la
intensidad de señal de la máxima contracción diaria del
diámetro del tronco**

6.1. Introducción

El riego en el cultivo del almendro, al igual que en otras especies frutales, ha sido tradicionalmente programado a partir de la metodología descrita por FAO (Allen *et al.*, 1998), pero las incertidumbres asociadas al cálculo de las dosis y frecuencias de riego, junto a la escasa disponibilidad de agua para la agricultura en muchas áreas del mundo, han propiciado el estudio de la utilidad de ciertos indicadores del estado hídrico del suelo y la planta para la toma de decisiones y optimización del uso del agua de riego.

MCD es considerada, por un gran número de investigadores, como uno de los indicadores del estado hídrico de la planta más sensibles al déficit hídrico. Esta alta sensibilidad unida a la posibilidad de registrar en continuo sus medidas (Ortuño *et al.*, 2010) ha abierto grandes expectativas para una futura automatización del riego basada en sus medidas. A nivel experimental, Goldhamer y Fereres (2001 y 2004) fueron los primeros en comprobar que la programación del riego del almendro a partir de MCD era posible y además ventajosa frente a otras metodologías de programación. Posteriormente, otros autores y en otros cultivos llegaron a conclusiones similares, tal y como García-Orellana *et al.* (2007) y Ortuño *et al.* (2009a-c) en limonero, Vélez *et al.* (2007) en clementino y Bonet *et al.* (2010) en ciruelo.

En este capítulo se evalúa la utilidad de la intensidad de señal de MCD ($IS = MCD_{\text{TRATAMIENTO}}/MCD_{\text{CTL}}$) para la programación del riego deficitario controlado del almendro, a partir del estudio de las relaciones hídricas y respuesta productiva.

6.2. Material y Métodos

Características de la parcela experimental

Las condiciones experimentales están recogidas en el capítulo 5 de la presente memoria de tesis (Apartado 5.2.2).

Tratamientos de riego

Se ensayaron 4 tratamientos de riego, según un diseño estadístico de bloques al azar, con tres bloques y una repetición de cada tratamiento por bloque de 12 árboles cada una. Los tratamientos fueron:

- i. Control (CTL), regado al 110% ET_c al objeto de evitar condiciones limitantes de agua en el suelo. ET_c se determinó a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_o, Allen *et al.*, 1998) y los coeficientes de cultivo obtenidos en árboles de porte similar cultivados en lisímetros de drenaje en la misma plantación durante los dos años anteriores.
- ii. Riego deficitario controlado tradicional (RDC_t), regado al 100% ET_c excepto durante la fase IV de acumulación rápida de materia seca del grano (\approx junio-mediados de agosto) cuando se aportó el 30% ET_c.
- iii. Riego deficitario continuo en base a MCD (RD_d), regado para mantener IS (MCD_{RDd}/MCD_{CTL}) en torno a 1,1 durante toda la estación de riego.
- iv. Riego deficitario controlado en base a MCD (RDC_d), regado para mantener IS (MCD_{RDCd}/MCD_{CTL}) entre 1 y 1,1, excepto en la fase IV, que fue de 1,4.

Medidas

Ψ_t y g_s se determinaron semanalmente en 6 hojas adultas y sanas por tratamiento de acuerdo al procedimiento descrito en el capítulo 3 (Apartado 3.4.1). Las medidas de los parámetros de intercambio gaseoso se tomaron en condiciones de saturación de luz, con un valor de radiación PAR de 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. La integral de estrés (S_Ψ) se calculó a partir de Ψ_t (Apartado 3.4.1), considerando -0,56 MPa el valor máximo de Ψ_t durante el periodo experimental.

FDT se obtuvo a partir de 5 sensores LVDT por tratamiento y los parámetros MCD y TCD de acuerdo con el apartado 3.4.1.

El crecimiento vegetativo se evaluó anualmente a partir de 15 árboles por tratamiento, controlando el peso fresco de la madera eliminada en la poda de invierno y el incremento de la sección transversal del tronco (ΔSTT). El peso seco

de poda se estimó a partir de la relación peso seco (Ps) vs peso fresco (Pf) de los restos de poda, obtenida por Nortes (2008) en la misma plantación:

$$Ps = 0,61 Pf + 0,1 \quad (r^2 = 0,99^{***}) \quad (\text{kg}) \quad [6.1]$$

La producción y calidad física de la cosecha se determinaron a partir de 5 árboles por repetición según los procedimientos descritos en los apartados 3.4.6 y 3.4.8.

La eficiencia de uso del agua se expresó como el cociente entre la producción de almendra grano y la cantidad de agua recibida por el cultivo (riego + lluvia).

Variabilidad de la intensidad de señal

La variabilidad de IS respecto al valor prefijado IS_p en cada fase fenológica se calculó a partir de la desviación absoluta media (DAM):

$$DAM = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |IS_i - IS_p|}{n} \quad [6.2]$$

donde n es el número de datos empleados en la ecuación e IS_i es el valor de IS correspondiente al día i .

6.3. Resultados y discusión

Agua aplicada

En la tabla 6.1 se muestra el volumen de riego aportado anualmente a CTL, así como la reducción de agua obtenida en los tratamientos deficitarios respecto a CTL. El volumen de riego medio en CTL fue de 680 mm y la reducción media de los aportes hídricos en RDC del 50% (RDC_t) y 45% (RDC_d), mientras que en RD_d fue del 21% (Tabla 6.1 y Figuras 6.1C-F). En 2006, RDC_t y RDC_d recibieron volúmenes de riego similares (325 y 311 mm, respectivamente), mientras que en 2007 fueron mayores en RDC_d (346 y 421 mm en RDC_t y RDC_d , respectivamente) y superiores en ambos tratamientos a los de 2006, hecho que se reflejó en una menor disminución de agua con relación a CTL (Tabla 6.1).

Tabla 6.1. Evapotranspiración de referencia (ET_o , mm), lluvia (mm) y agua aplicada (mm) al tratamiento control (CTL). Porcentaje de ahorro de agua respecto a CTL en los distintos tratamientos de riego durante el período experimental.

mm	2006	2007	Media
ET_o	1270	1229	1250
Lluvia	320	356	338
Riego (CTL)	723	619	680
% de reducción de agua respecto al CTL			
RDC_t	55	44	50
RD_d	23	19	21
RDC_d	57	32	45

Programación de riego

Durante el primer año de estudio (2006) la frecuencia de programación del riego en los tratamientos RD_d y RDC_d fue semanal, tratando de mantener los valores de IS próximos a los prefijados (IS_p). RD_d mantuvo valores cercanos a 1,1 en las fases II y III, exceptuando el día 128 en el que se elevó a 1,2 debido a la supresión del riego tras las lluvias de abril (Figura 6.1C). Al inicio de la fase IV, IS volvió a mostrar valores elevados (1,3), que se redujeron por debajo de 1,1 al incrementar el volumen de agua de riego a los árboles RD_d (Figura 6.1C).

RDC_d presentó valores de IS similares a RD_d en la fase III (Figura 6.1E), y superiores en la IV, para mantener IS en torno a 1,4 y con ello conseguir un ahorro de agua superior durante esta fase, considerada poco sensible al déficit hídrico (Goldhamer, 1996). IS se mantuvo en torno al valor prefijado, excepto el día 191 ($IS = 1,1$) por avería en el programador de riego. Durante la fase V, una vez restituido el riego al nivel de CTL, se redujeron drásticamente sus valores hasta 0,5, no alcanzándose los de IS_p hasta 4 semanas después. Por ello, la restitución del riego en este cultivo tras un período de déficit hídrico debería ser realizada de forma gradual, hecho que se tuvo en cuenta al año siguiente.

En 2007, segundo año de estudio, se aumentó a 3-4 días la frecuencia de ajuste de IS en ambos tratamientos. Esto permitió corregir las fluctuaciones de IS en torno a IS_p con mayor precisión que en 2006, disminuyendo las variaciones en la dosis de riego (Figura 6.1D, F). La programación del riego se inició el día 148 (55 días después que en 2006), al mantenerse IS próximo a IS_p , a excepción de los días

Figure 1 consists of six panels (A-F) arranged in a 3x2 grid, showing meteorological and hydrological data for the years 2006, 2007, 2008, and 2009. The x-axis for all panels is 'Día del año' (Day of the year), ranging from 50 to 350.

- Panel A (2006):** Shows DPV_{mx} (kPa) on the left y-axis (0 to 6) and precipitation (mm d⁻¹) on the right y-axis (0 to 40). The plot includes black dots for DPV_{mx} and a blue line for precipitation.
- Panel B (2007):** Shows DPV_{mx} (kPa) on the left y-axis (0 to 6) and precipitation (mm d⁻¹) on the right y-axis (0 to 40). The plot includes black dots for DPV_{mx} and a blue line for precipitation.
- Panel C (2006):** Shows MCD_{RDd} / MCD_{CTL} on the left y-axis (0.0 to 2.5) and '% Variación del riego' on the right y-axis (-150 to 150). The plot includes a grey bar chart for irrigation variation, a blue line for MCD_{RDd} / MCD_{CTL} , and a red curve for the fitted model. The DAM value is 0,19. The plot is divided into five phases (Fase II to Fase V) by vertical dashed lines.
- Panel D (2007):** Shows MCD_{RDd} / MCD_{CTL} on the left y-axis (0.0 to 2.5) and '% Variación del riego' on the right y-axis (-150 to 150). The plot includes a grey bar chart for irrigation variation, a blue line for MCD_{RDd} / MCD_{CTL} , and a red curve for the fitted model. The DAM value is 0,16. The plot is divided into five phases (Fase II to Fase V) by vertical dashed lines.
- Panel E (2008):** Shows MCD_{RDd} / MCD_{CTL} on the left y-axis (0.0 to 2.5) and '% Variación del riego' on the right y-axis (-200 to 200). The plot includes a grey bar chart for irrigation variation, a blue line for MCD_{RDd} / MCD_{CTL} , and a green curve for the fitted model. The DAM value is 0,24. The plot is divided into five phases (Fase II to Fase V) by vertical dashed lines.
- Panel F (2009):** Shows MCD_{RDd} / MCD_{CTL} on the left y-axis (0.0 to 2.5) and '% Variación del riego' on the right y-axis (-200 to 200). The plot includes a grey bar chart for irrigation variation, a blue line for MCD_{RDd} / MCD_{CTL} , and a green curve for the fitted model. The DAM value is 0,22. The plot is divided into five phases (Fase II to Fase V) by vertical dashed lines.

RD_d mantuvo valores de IS cercanos a IS_p (1,1) durante las fases II y III (Figura 6.1D), que llegaron a 1,3 al inicio de la fase IV, probablemente debido a un insuficiente incremento de las dosis de riego en relación con el aumento de la demanda climática. Posteriores ajustes de las dosis de riego permitieron mantener IS

relativamente estable en torno al umbral (1,1). Al inicio de la fase V se produjo una caída importante de IS (0,72), a pesar de la reducción de los aportes de agua (Fig. 6.1D).

Durante las fases II y III, periodo en el que se perseguía idéntica IS en RD_d y RDC_d, las variaciones de IS fueron muy similares en ambos tratamientos, a excepción de algunos valores puntuales al final de la fase III (Figuras 6.1 D y F). La reducción del riego en un 40% en RDC_d al inicio de la fase IV incrementó IS a 1,5, próximo al prefijado para esta fase. Al igual que sucedió en RD_d, no se consiguió estabilizar IS en torno a IS_p, hasta el día 190, 35 días después de comenzar la fase IV. Al comienzo de la fase V, IS descendió, hasta 0,76, aunque no de forma tan acusada como en 2006 (0,51), debido al incremento en la frecuencia de la programación del riego y a la aplicación de dosis de riego inferiores a las de CTL. De igual modo, García-Orellana *et al.* (2007) y Ortuño *et al.* (2009b, c) después de 3 años programando el riego de limoneros adultos en base a MCD encontraron cierta dificultad en otoño e invierno para mantener el valor de IS_p en torno a 1,0 procedentes de árboles sometidos a riego deficitario continuo, por lo cual propusieron incrementar IS_p o disminuir la frecuencia del riego. El hecho de que los árboles hayan estado sujetos a déficit hídrico puede ser causa del desarrollo de mecanismos adaptivos a la sequía, como control del estado hídrico a través de la conductancia estomática (Tyree y Sperry, 1988; Ruiz-Sánchez *et al.*, 2000) que les permitiría bajo condiciones de baja demanda mantener valores de MCD inferiores a los de CTL.

Conejero (2008) a través del ajuste diario de las dosis de riego consiguió disminuir sustancialmente las desviaciones de IS respecto a IS_p. Sin embargo, hay que tener en cuenta el carácter multidependiente de MCD, como lo han puesto de manifiesto diversos autores. MCD no sólo puede verse modificada por las condiciones climáticas y de humedad del suelo, sino también por el tamaño del árbol (Intrigliolo y Castel, 2006), carga productiva (Intrigliolo y Castel, 2007), edad del cultivo (Egea *et al.*, 2009) y fase fenológica (Ortuño *et al.*, 2010). En un ensayo de programación del riego deficitario en ciruelo, Bonet *et al.* (2010) tuvieron dificultad para mantener IS en torno a los valores prefijados. Estos autores estimaron la MCD

correspondiente a árboles sin limitación de agua en el suelo obtenidos en la misma parcela años atrás, por lo que achacaron la dificultad para ajustar IS al valor deseado a los diferentes factores que pudieran haber modificado los valores de MCD para unas condiciones de clima determinadas. Otros autores combinando valores umbrales absolutos de MCD con medidas del potencial matricial del agua en el suelo han obtenido buenos resultados. Bonany y colaboradores, citados por Ortuño *et al.* (2010), en ensayos realizados en manzanos consiguieron ahorros de agua, respecto a un control tradicional, del 38% cuando estos fueron regados para mantener valores de Ψ_m y MCD en torno a -15 kPa y 200 μm , respectivamente.

La desviación absoluta media (DAM) de IS respecto a IS_p disminuyó al aumentar la frecuencia de programación del riego (Figura 6.1C-F) mejorando los ajustes sustancialmente en 2007. IS fluctuó alternativamente por encima y por debajo de IS_p dando lugar a menores modificaciones en el agua aportada (% variación del riego). Estos valores también fueron inferiores en el tratamiento RD_d que en el RDC_d en los dos años (Figura 6.1C-F), lo que sugiere que es más fácil ajustar los valores de IS a bajas que a altas IS_p .

Estado hídrico e intercambio gaseoso en la planta

Los valores de Ψ_t en CTL fueron muy estables y superiores a -1,00 MPa durante la mayor parte del periodo experimental, a excepción de algunos días de la fase IV en los que el elevado DPV los hizo disminuir hasta alcanzar valores cercanos a -1,25 MPa (Figuras 6.1A, B y 6.2E, F). Estos valores son similares a los obtenidos en almendro bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo por Shackel *et al.* (1997, 1998), Fereres y Goldhamer (2003) y Rosati *et al.* (2006). En almendros jóvenes, Nortes (2008) obtuvo Ψ_t de -1,20 MPa durante la fase IV, los que de forma similar a los obtenidos por McCutchan y Shackel (1992) y Romero y Botía (2006) estuvieron asociados a una mayor demanda evaporativa.

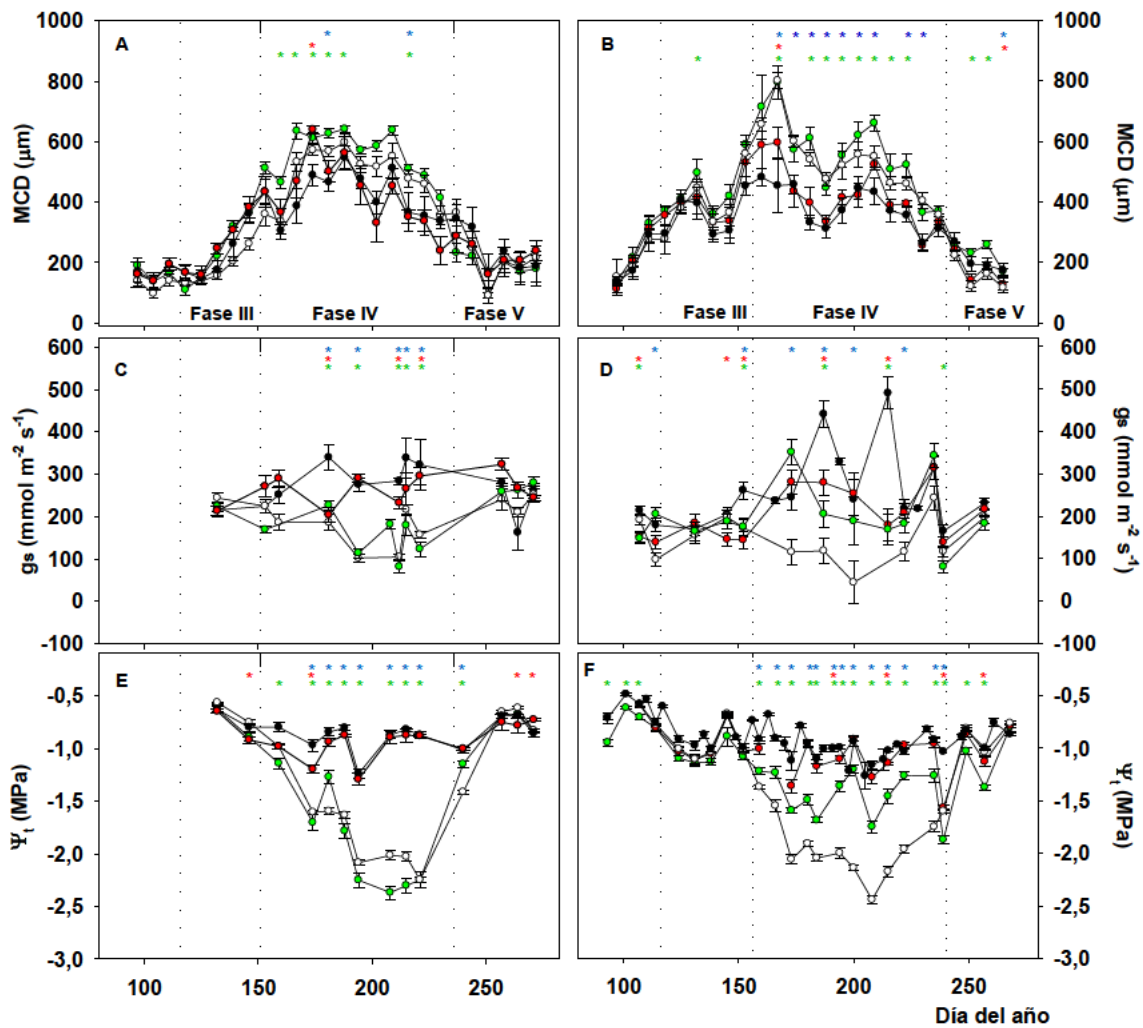


Figura 6.2. Evolución de la máxima contracción diaria del diámetro de tronco, media semanal, (MCD), de la conductancia estomática (g_s) y potencial de tallo a mediodía (Ψ_t) durante 2006 y 2007 (A, C, E y B, D, F, respectivamente) para los tratamientos CTL ●; RDC_t ○; RD_d ● y RDC_d ●. Cada punto corresponde a la media de 5 (MCD) y 6 (Ψ_t y g_s) medidas \pm ES. Los asteriscos indican diferencias significativas entre los tratamientos deficitarios RDC_t (*), RD_d (*) y RDC_d (*) y CTL según el test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$). Las líneas verticales indican la separación entre fases fenológicas.

El tratamiento RD_d mostró valores similares a CTL durante los dos años de estudio excepto en dos días de medida durante la fase IV. En estos días, Ψ_t disminuyó ligeramente ($\leq 0,25$ MPa) respecto a CTL, coincidiendo con una IS de 1,20 (Figura 6.1). Sin embargo Ψ_t fue inferior a CTL en RDC_t y RDC_d durante la mayor parte de la fase IV. Los valores Ψ_t mínimos alcanzados en RDC_t y RDC_d fueron -2,35 y -2,45 MPa en 2006 y -2,50 y -1,80 MPa en 2007, respectivamente (Figura 6.2E, F), valores que se corresponden con un nivel de déficit hídrico moderado-severo. En el último año RDC_d presentó un valor más elevado debido a

la menor reducción de agua con respecto a CTL (Tabla 6.1), dado que durante ese año la programación del riego se realizó con mayor frecuencia.

El mayor nivel de déficit hídrico, evaluado a partir de la integral de estrés hídrico (S_{Ψ} ; Myers, 1988) se alcanzó en RDC_t (Tabla 6.2), al promediar 87,85 MPa día durante el período experimental. Este valor fue 3,9 y 1,15 veces superior al de RD_d y RDC_d , respectivamente, aunque en 2006 S_{Ψ} fue superior en RDC_d . La mayor frecuencia de ajuste de IS en 2007 supuso un menor estrés hídrico y una menor reducción del agua aplicada con respecto a CTL (Tabla 6.1), lo contrario que en RDC_t donde S_{Ψ} aumentó. S_{Ψ} mostró una estrecha relación con el volumen de riego, de manera que el valor S_{Ψ} más alto se correspondió con los mayores ahorros de agua (50%; Tabla 6.1 y 6.2).

Tabla 6.2. Integral de estrés hídrico (S_{Ψ}) para los tratamientos deficitarios. S_{Ψ} se determinó a partir de las medidas de potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_d).

Tratamiento	S_{Ψ} (MPa día)		
	2006	2007	Promedio
RDC_t	79,26	96,43	87,85
RD_d	18,74	26,39	22,57
RDC_d	87,80	64,47	76,14

Intrigliolo y Castel (2005) encontraron una buena correlación entre este parámetro y la disminución del peso del fruto y crecimiento del tronco en ciruelo japonés, mientras que Moriana *et al.* (2007) lo observaron con la pérdida de calidad del aceite de oliva.

Los valores de MCD aumentaron constantemente desde principios de abril ($\approx 200 \mu\text{m}$) hasta mediados de junio ($\approx 500 \mu\text{m}$ en CTL), permanecieron relativamente estables durante los meses de verano y disminuyeron a partir de septiembre. El aumento constante de MCD coincidió con el ascenso de la temperatura y de las tasas de transpiración que tienen lugar durante esta época del año y con un crecimiento en longitud de los brotes, lo que supuso un incremento de área foliar. Ginestar y Castel (1996b) en clementinos jóvenes y Huguet *et al.* (1992) en manzanos indicaron un efecto similar. Los valores más altos coincidieron en todos los tratamientos con la mayor demanda evaporativa y los deficitarios

presentaron en general MCDs más altas, sin que se diesen diferencias entre los tratamientos CTL y RD_d, y con claras diferencias entre CTL y los tratamientos de RDC, especialmente durante la fase IV de 2007 (Figura 6.2A, B). Las máximas diferencias respecto a CTL estuvieron en torno a 350 μm tanto para RDC_t como RDC_d y coincidieron con valores de Ψ_t de -1,5 MPa frente a los -0,8 MPa de CTL (Figura 6.2F). La caída adicional de Ψ_t a partir de junio en RDC_t y RDC_d no se tradujo en un incremento de las diferencias de MCD. En esta misma línea, Ortuño *et al.* (2010) señalan que a pesar de que los incrementos de MCD suelen asociarse a reducciones en Ψ_t , esta conducta puede cambiar al superar un determinado nivel de déficit o valor umbral de Ψ_t . De ahí que Huguet *et al.* (1992) indicaran que MCD es un buen indicador de la intensidad de la transpiración cuando el agotamiento hídrico del suelo no es excesivamente severo. Aunque MCD y Ψ_t mostraron conductas similares, pero de signo contrario, queda patente que mientras MCD puede ser más sensible que Ψ_t para detectar déficit hídrico ligero, éste está más indicado cuando se trata de un déficit hídrico moderado-severo en planta.

g_s presentó en general valores más bajos en los tratamientos deficitarios que en CTL, pero las diferencias entre tratamientos variaron sensiblemente con la fase de desarrollo (Figura 6.2C y D). CTL presentó valores medios durante el periodo estival de 269 y 260 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en 2006 y 2007, respectivamente, valores muy similares a los obtenidos por otros autores en almendros bien regados (Marsal *et al.*, 1997; Romero *et al.*, 2004a; Girona *et al.*, 2005a; Egea *et al.*, 2011). De los tratamientos deficitarios, RDC_t fue el que mostró la mayor regulación estomática, observándose las máximas diferencias respecto a CTL durante la fase de llenado del grano (Fase IV). Igualmente, RD_d y RDC_d alcanzaron valores medios significativamente inferiores a CTL. Las diferencias observadas entre RDC_t y RDC_d no fueron significativamente diferentes en 2006 pero sí en 2007 (Figura 6.2C y D). Tanto en las primeras fases como en la última, fases II–III y V, todos los tratamientos deficitarios presentaron g_s similares a CTL, aunque se dieron diferencias puntuales. Los de RD_d estuvieron en general más próximos a los de CTL que a los de RDC_t y RDC_d. Este comportamiento de reducción de los valores g_s con la disminución del agua en el suelo por efecto del tratamiento, es similar al

mostrado por Ψ_t , independientemente de la menor variabilidad de éste último, y viene a confirmar la alta sensibilidad de este indicador al déficit hídrico, la que ya fue observada en almendro por Girona *et al.* (1993), Marsal *et al.* (1997), Romero *et al.* (2004a), Gomes-Laranjo *et al.* (2006) y Egea *et al.* (2011). Además este estudio ratifica el hecho de que el almendro exhibe características de conducta anisohídrica, ya que Ψ_t disminuyó drásticamente en RDC_t y RDC_d a lo largo de la fase IV tras el inicio de la reducción de las dosis de riego (Figura 6.2E y F). Este patrón anisohídrico se observa a menudo en especies cuyo control estomático (en respuesta a las señales raíz-brote) es insuficiente para mantener el estado hídrico de la planta a medida que disminuye la disponibilidad de agua en el suelo (Figuras 6.2C, D, E y F), contrariamente a lo que ocurre en las isohídricas, que tienden a mantener estable su estado hídrico con la pérdida de humedad del suelo (Vogt, 2001; Jones, 2007).

Crecimiento vegetativo

TCD estuvo influenciada tanto por la fenología del cultivo como por el régimen de riego. En 2006, CTL inició su actividad con una tasa de crecimiento elevada, en torno a $120 \mu\text{m día}^{-1}$, la que se mantuvo relativamente constante hasta el día 120 (final de la fase II) para después descender a tasas de $50 \mu\text{m día}^{-1}$ al inicio de la fase IV (día 150), manteniéndose constante hasta el final de la estación de crecimiento con valores medios de $60\text{-}70 \mu\text{m día}^{-1}$ (Figura 6.3A). Egea *et al.* (2010) relacionaron esta ralentización del crecimiento del tronco con la alta demanda evaporativa y/o la alta demanda de asimilados por parte del fruto, lo que también reflejaron Goldhamer *et al.* (1999). En 2007, los valores de TCD en el tratamiento control fueron inferiores a los de 2006, suavizándose incluso el descenso que suele tener lugar al inicio de la fase IV. El valor medio de TCD en CTL durante toda la estación de crecimiento de 2007 estuvo en general por debajo de $50 \mu\text{m día}^{-1}$ (Figura 6.3B).

En cuanto al efecto del régimen de riego sobre TCD, RD_d presentó valores significativamente diferentes a CTL en la mayor parte del ciclo de crecimiento de 2006. La mayor reducción, del orden del 43% respecto a CTL, tuvo lugar durante el primer tercio de la fase IV y coincidió con un valor de IS en torno a 1,2, mostrando

valores superiores a CTL a partir del día 195 con IS en torno a 0,90 (Figuras 6.1C y 6.3A). Sin embargo, en 2007 apenas se dieron diferencias entre CTL y RD_a, posiblemente como consecuencia de la reducción de los valores de TCD en ambos tratamientos. La tendencia relativa de TCD fue muy similar en los dos años de estudio, con valores generalmente inferiores en RD_a durante la primera mitad del ciclo de crecimiento y superiores durante la segunda mitad del mismo. La restitución del riego en los tratamientos deficitarios promovió valores de TCD más elevados que en CTL.

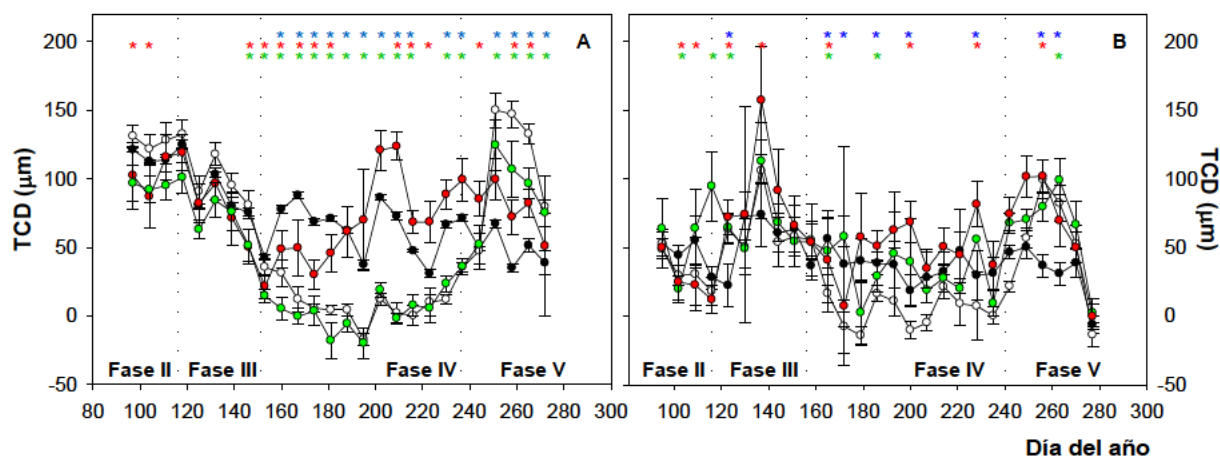


Figura 6.3. Evolución anual de la tasa de crecimiento diaria de tronco (TCD) durante 2006 (A) y 2007 (B) para los tratamientos de riego: CTL ●; RDC_t ○; RD_d ●; RDC_d ●. Cada punto representa la media semanal de TCD obtenida a partir de 5 medidas de diámetro de tronco \pm ES. Los asteriscos indican diferencias de RDC_t (*), RD_d (*) y RDC_d (*) respecto a CTL según el test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$). Las líneas verticales indican la separación entre fases fenológicas.

El comportamiento de los tratamientos RDC_t y RDC_d durante la fase IV, principal periodo de la estación de riego, fue altamente dependiente del aporte hídrico. Así en 2006, con reducciones hídricas similares y del orden del 56% respecto a CTL, ambos presentaron tasas cercanas a cero mientras que en 2007, la menor reducción de agua aplicada en RDC_d (32%) frente al 44% de RDC_t indujo TCD superiores a RDC_t ($\approx 0 \mu\text{m día}^{-1}$) y similares a CTL ($\approx 40 \mu\text{m día}^{-1}$). Durante la fase V, una vez restituido el riego, ambos tratamientos experimentaron un crecimiento compensatorio en los dos años de estudio, al presentar tasas por encima de $100 \mu\text{m día}^{-1}$, valores superiores al resto de tratamientos (Figura 6.3A y B).

Los valores de TCD presentados en la figura 6.3 concuerdan con los incrementos experimentados por la sección transversal del tronco (ΔSTT) y peso

seco de la poda (Tabla 6.3). Durante todo el período experimental, CTL registró los valores más elevados de ΔSTT y de poda con un promedio de 29,3 mm² año⁻¹ y 17,7 kg año⁻¹, respectivamente. En 2006 RD_d redujo significativamente en un 25% ΔSTT y en un 22% de poda respecto a CTL, mientras que en 2007 no se observaron diferencias significativas, posiblemente debido a la menor reducción de agua. El comportamiento interanual de TCD en los tratamientos RDC fue muy similar al descrito para RD_d. Así, durante la fase IV de 2006 con TCD próximas a 0 $\mu\text{m día}^{-1}$, el crecimiento del tronco fue claramente diferente al de CTL y RD_d e idéntico para ambos tratamientos de RDC. Sin embargo en 2007, el mayor suministro hídrico relativo de RDC_d causó un crecimiento desigual entre ambos tratamientos de RDC, siendo en RDC_d superior a RDC_t (Tabla 6.3).

La disminución del crecimiento vegetativo de árboles bajo riego deficitario ha sido indicada en numerosos trabajos (Goodwin y Boland, 2002; Loveys *et al.*, 2004; Girona *et al.*, 2005a; Goldhamer *et al.*, 2006). Esto puede resultar ventajoso al suponer una economía de mano de obra y empleo de maquinaria en las tareas de poda de ramas (Mitchel *et al.*, 1989), aplicación de tratamientos fitosanitarios u hormonales al objeto de controlar el crecimiento y disminuir el sombreado (Goodwin y Boland, 2002).

Tabla 6.3. Valores medios del incremento de la sección transversal del tronco (ΔSTT) y peso seco de poda para los distintos tratamientos de riego en ambas campañas de ensayo.

Tratamiento	ΔSTT (cm ²)		Poda (kg árbol ⁻¹)	
	2005/06	2006/07	2006	2007
CTL	35,4 a	23,1 a	19,7 a	15,7 a
RDC _t	15,1 c	7,3 c	10,6 c	8,4 c
RD _d	26,4 b	22,6 a	15,4 b	14,5 ab
RDC _d	10,6 c	12,8 b	10,7 c	11,8 b

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$).

Tanto el peso seco de las ramas de poda como ΔSTT mostraron una alta correlación negativa con S_{Ψ} (Figura 6.4). Shackel *et al.* (2000) observaron una relación lineal negativa entre el tamaño del árbol y Ψ_t , e igualmente Egea *et al.* (2010) informaron de claras relaciones lineales del crecimiento del tronco, volumen de copa y peso de poda frente al volumen de agua aplicado.

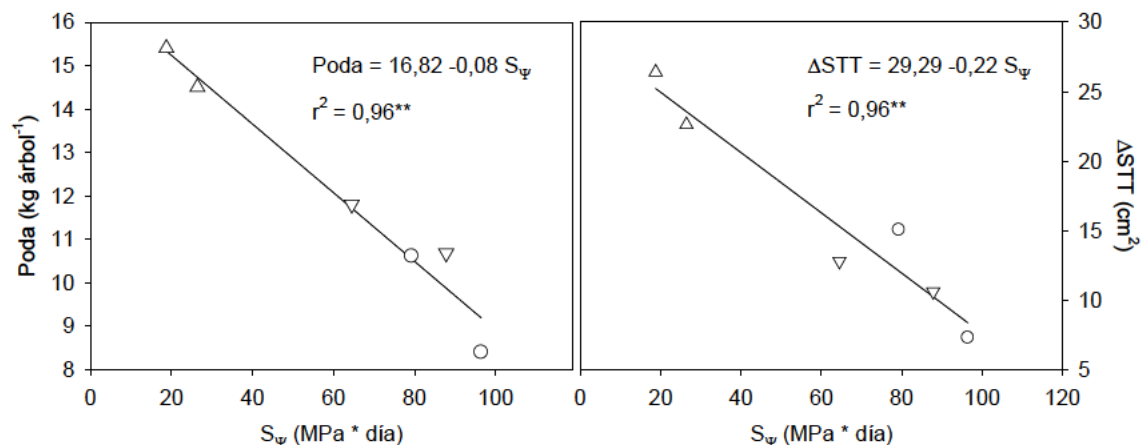


Figura 6.4. Relación entre el peso seco de las ramas de poda (izquierda) e incremento de la sección transversal del tronco (ΔSTT) (derecha) con la integral de estrés (S_{Ψ}) en los tratamientos deficitarios (RDC_t O; RD_d Δ; RDC_d ▽).

Producción

Durante el período experimental los árboles CTL produjeron de media 1853 kg ha⁻¹ de almendra-grano, producción similar a la recogida en la bibliografía para árboles bien regados (Girona *et al.*, 2005a, Goldhamer *et al.*, 2006). La fracción grano/almendra-cáscara estuvo en torno al 30%, valor considerado propio de la variedad (Felipe, 2000). El hecho de que se alcanzase un mayor rendimiento y carga productiva en 2007 que en 2006 en CTL ($\approx \Delta 300$ kg ha⁻¹ de almendra-grano), pudo ser la causa de la disminución de TCD en este tratamiento (Figura 6.3). El resto de tratamientos tuvieron una respuesta productiva de acuerdo al déficit hídrico alcanzado. RD_d presentó una producción similar a CTL el primer año y un 20% inferior el segundo, debido posiblemente al incremento de S_{Ψ} alcanzada en este año (Tablas 6.4 y 6.2).

La respuesta productiva de los tratamientos RDC fue diferente en 2006 y 2007. Así, mientras que RDC_t presentó una reducción media del 26% en ambas cosechas como consonancia a la reducción de agua impuesta (Tabla 6.1 y 6.4); RDC_d no se vio afectado en la cosecha de 2006, a pesar del 57% de reducción en los aportes hídricos y, en cambio, sí lo hizo en 2007, cuando esta reducción fue sustancialmente menor (Tablas 6.1 y 6.4). El comportamiento observado en RDC_d puede ser atribuido al hecho de que al ser el ciclo reproductivo del almendro de dos años de duración, el déficit al que fueron sometidos en 2006 influyó negativamente

en la producción de 2007. En este sentido, la reducción de la cosecha de RDC_t producida en 2006 sería explicada por el hecho de que los árboles de este tratamiento habían estado previamente sometidos a RDC. Prichard *et al.* (1992) y Esparza *et al.* (2001b) concluyeron que la reducción del crecimiento vegetativo por efecto del estrés hídrico fue el principal mecanismo implicado en la reducción de la producción, a través de la reducción del número de posiciones de fruto. En nuestro ensayo se observó menor crecimiento vegetativo en los tratamientos RDC en la campaña 2005/06 (Tabla 6.3).

La reducción de la producción en los tratamientos RDC puede ser atribuida a un menor número de frutos por árbol lo que permitió mantener el peso medio del grano similar a CTL (Tabla 6.4). RDC_d mostró un peso medio de grano inferior en la primera campaña, lo que podría estar relacionado con la mayor carga productiva con respecto al resto de tratamientos. Diferentes autores han comprobado el efecto de la carga sobre el peso del grano en almendro (Ferreira y Goldhamer, 1990; Puerto *et al.*, 2010). Goldhamer *et al.* (2006) consideran que la aplicación de un estrés hídrico, incluso moderado, antes de la cosecha, puede tener un efecto significativo sobre el peso seco del grano. Esto puede ser debido a la reducción de la capacidad fotosintética de las hojas en este periodo del año, con la limitación de asimilados disponibles para el crecimiento del fruto (Esparza *et al.*, 2001a). La fracción almendra-grano/almendra-cáscara no fue afectada por el tratamiento de riego en ninguno de los años de estudio, coincidiendo con lo observado por Torrecillas *et al.* (1989) y Romero *et al.* (2004b).

La eficiencia productiva, expresada como producción por unidad de STT, no mostró diferencias entre tratamientos, corroborando que las diferencias de producción observadas están relacionadas con el tamaño de los árboles y el número de posiciones fructíferas (Esparza *et al.*, 2001b). Sin embargo, otros autores (Egea *et al.*, 2009; Goldhamer *et al.*, 2006) encontraron valores superiores en árboles regados de forma deficitaria, manifestándose una mayor densidad fructífera en estos tratamientos respecto a los bien regados. Por el contrario, sí se observaron diferencias significativas en la relación entre la producción y ΔSTT en los diferentes tratamientos de riego; así RDC_d en 2006 y los dos tratamientos de RDC en 2007,

resultaron superiores a CTL (Tabla 6.5), reflejando que el reparto de recursos fue favorable a la productividad en los tratamientos deficitarios. González-Altozano y Castel (1999) utilizaron esta relación en mandarino, para separar los recursos destinados al crecimiento vegetativo y al productivo.

La eficiencia de uso del agua de riego (EUA) aumentó en los tratamientos deficitarios en 2006 con la reducción de los aportes hídricos (Tabla 6.5), lo que es coincidente con lo indicado por otros autores (Torrecillas *et al.*, 1989; Hutmacher *et al.*, 1994; Romero *et al.*, 2004b). En cambio, estos valores se igualaron en 2007, debido a la mayor producción mostrada por CTL con respecto al resto de tratamientos.

Tabla 6.4. Influencia de los tratamientos de riego en la producción y componentes de la cosecha de almendro cv. Marta. Período 2006-2007.

	Producción				n° frutos árbol ⁻¹		Fracción de grano (%)		Peso medio grano (g)	
	almendra-cáscara kg ha ⁻¹		almendra-grano kg ha ⁻¹							
	2006	2007	2006	2007						
CTL	5763a	6753a	1712a	1994a	4822ab	6407a	29,68a	29,47a	1,49a	1,31a
RDC _t	4458b	4823bc	1332b	1398b	3894c	5082b	29,89a	29,01a	1,44a	1,17a
RD _d	5172a	5702b	1569ab	1596b	4371bc	5752ab	30,26a	27,94a	1,51a	1,21a
RDC _d	5190a	4747c	1590ab	1388b	5199a	4672b	30,58a	29,15a	1,29b	1,26a

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Rango Múltiple de Duncan (P<0,05).

Tabla 6.5. Influencia de los tratamientos de riego en los índices de eficiencia productiva y de uso del agua de riego en almendro cv. Marta durante el período experimental.

	Eficiencia productiva				Eficiencia en el uso del agua (EUA)	
	Producción/STT (kg cm ⁻²)		Producción/ΔSTT (kg cm ⁻²)		(kg m ⁻³)	
	2006	2007	2006	2007	2006	2007
CTL	6,69	7,34	52,5 b	62,6 c	0,16 c	0,20
RDC _t	7,67	7,13	55,7 b	192,6 a	0,20 b	0,20
RD _d	7,34	6,25	110,0 b	76,0 bc	0,18 bc	0,19
RDC _d	8,42	6,44	167,3 a	107,5 b	0,25 a	0,18
ANOVA	n.s	n.s.				n.s

n.s.: no significativo. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Rango Múltiple de Duncan (P<0,05).

Calidad física de la almendra

El tratamiento de riego no afectó al porcentaje de almendras pelonas, dobles y vacías en ninguno de los años de estudio (Tabla 6.6), lo que coincide con lo observado por Egea *et al.* (2010) en la misma variedad cuando fue igualmente sometida a déficit hídrico ligero-moderado.

Tabla 6.6. Influencia de los tratamientos de riego sobre los determinantes de producción: almendras pelonas, dobles y vacías para cada año de estudio.

	Pelonas		Dobles		Vacías	
Tratamiento	(%)					
	2006	2007	2006	2007	2006	2007
CTL	1,99	0,86	0,00	0,00	0,00	0,86
RDC _t	1,95	2,33	0,00	0,00	0,56	1,03
RD _d	0,54	0,30	0,00	0,00	0,00	0,81
RDC _d	1,64	1,09	0,00	0,00	0,16	1,38
ANOVA	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s

n.s.: sin diferencias significativas.

Las dimensiones de la almendra en cáscara tampoco se vieron modificadas por los diferentes tratamientos de riego aplicados. Tan sólo en 2006 los frutos RDC_d fueron más finos que los RD_d (Tabla 6.7). En cambio, las dimensiones del grano sí se vieron afectadas por el efecto del riego, siendo lo más significativo la reducción de la longitud y anchura en RDC_d en 2006, y del espesor y del índice I1 en RDC_t en 2007 (Tabla 6.8).

Tabla 6.7. Influencia de los tratamientos de riego sobre las dimensiones de la almendra-cáscara e índices de forma durante el período de ensayo.

		Longitud	Anchura	Espesor	I1	I2	θ
2006	CTL	33,90	23,12 ab	17,11	50,62	68,33	70,16
	RDC _t	34,03	23,28 ab	17,08	50,51	68,69	70,22
	RD _d	34,44	23,57 a	17,16	50,00	68,57	69,96
	RDC _d	31,87	22,09 b	16,79	52,99	69,45	71,58
	ANOVA	n.s.		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
2007	CTL	30,23	21,92	16,77	55,59	72,55	64,07
	RDC _t	30,02	21,84	16,47	55,10	72,91	64,01
	RD _d	30,01	21,90	16,54	55,21	73,01	64,11
	RDC _d	29,78	21,59	16,40	55,15	72,53	63,84
	ANOVA	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

n.s.: no significativo. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$).

Tabla 6.8. Influencia de los tratamientos de riego sobre las dimensiones de la almendra-grano e índices de forma durante el ensayo.

		Longitud	Anchura	Espesor	I1	I2	θ
2006	CTL	26,55 a	14,97 a	8,40	31,70	56,47	56,30 ab
	RDC _t	26,48 a	14,68 ab	8,26	31,35	55,45	55,73 b
	RD _d	27,35 a	15,12 a	8,59	31,51	55,33	55,80 b
	RDC _d	25,38 b	14,11 b	8,26	32,64	55,71	56,60 a
2007	CTL	23,22	15,20	8,73 a	37,60 a	65,11	51,36
	RDC _t	22,91	13,34	7,93 b	34,70 b	58,47	46,59
	RD _d	23,10	13,54	8,50 a	36,97 a	58,61	47,79
	RDC _d	22,95	13,20	8,51 a	37,12 a	57,58	47,35

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Rango Múltiple de Duncan ($P < 0,05$).

6.4. Conclusiones

Los resultados obtenidos confirman la idoneidad del almendro para ser cultivado en riego deficitario controlado, lo que permite reducir los aportes hídricos en torno a un 50%. No obstante, se recomienda no alcanzar valores de déficit hídrico inferiores a -1,8 MPa de potencial de tallo a mediodía o una integral de estrés por encima de 70 MPa día durante la estación de riegos, puesto que de esta forma la reducción en el crecimiento vegetativo incidiría de forma negativa en la producción del año siguiente, al disminuir el número de posiciones fructíferas.

Con fines de programación del riego, la intensidad de señal de la máxima contracción diaria de diámetro de tronco (IS) es menos eficaz cuando se emplea a bajas (cada 7 días) que a altas (cada 3 días) frecuencias de ajuste del riego, ya que estas últimas facilitan el mantenimiento de la Intensidad de Señal deseada.

La utilización de distintos umbrales de IS en la programación del riego del almendro dificultó el mantenimiento de IS en torno a sus valores preestablecidos, especialmente durante la fase V, donde una vez restituido el riego la respuesta adaptativa del cultivo al estrés hídrico, propició valores de crecimiento muy superiores al control.

Los resultados mostrados confirman el hecho de que es posible programar el riego de almendros adultos en base a la Intensidad de Señal de MCD como único indicador de las necesidades de riego.

La conveniencia de utilizar un riego deficitario basado en la dendrometría frente al riego deficitario controlado en base a ET_c radica en la posibilidad de conseguir un mejor control del estado hídrico de la planta, que redundaría en un incremento de la productividad del agua.

7. Conclusiones generales

Los resultados presentados en esta Tesis Doctoral muestran la utilidad de los indicadores del estado hídrico de la planta para la optimización del riego en los cultivos estudiados. En mandarino cv. Fortune han permitido la delimitación de forma precisa de la aplicación del déficit hídrico durante la fase de rápido crecimiento del fruto, favoreciendo así un mayor ahorro de agua. La ralentización del crecimiento del tronco, cuando el fruto aún presenta tasas elevadas de crecimiento, marca el momento de tránsito para la restitución del riego al 100% del control. Además, la tasa de crecimiento diaria del tronco (TCD) resultó útil en la fase II del crecimiento del fruto en mandarino para detectar estrés hídrico. En cuanto a la intensidad del déficit, se ha comprobado que valores del potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) en torno a -2 MPa durante el período crítico de la fase II no ocasionaron reducciones significativas en la producción, durante los dos primeros años de experimentación, antes de ponerse de manifiesto el efecto acumulativo de la salinidad.

Se observó la posibilidad de emplear la intensidad de señal (IS) de la máxima contracción diaria del tronco (MCD) para la programación del riego en almendro con frecuencias inferiores a 3 días manteniendo un mejor estado hídrico de la planta en árboles sometidos a riego deficitario, lo que incrementaría la eficiencia en el uso del agua.

Las líneas de referencia basadas en la relación MCD *vs* variables meteorológicas obtenidas para los cultivos estudiados podrían emplearse como valores MCD de referencia en la programación del riego evitando así mantener en la explotación árboles sin limitación de agua en el suelo. Si bien en el caso del almendro se obtendrían cada año durante los primeros meses del año, en mandarino se obtendrían cada dos años.

Las condiciones de agua salina que se dieron en mandarino durante los dos últimos años del experimento, permitieron ver la interacción negativa entre el riego deficitario controlado y la salinidad, mostrando la incapacidad del tratamiento RDC de mantener producciones similares a CTL al tercer año de experimentación a pesar de haber presentado durante los dos primeros los mayores índices de EUA. Se observó el interés de aplicar agua por encima de las necesidades hídricas del cultivo

durante la fase III del crecimiento del fruto tal y como se hizo en FINCA ya que atenuó los efectos adversos de la salinidad al favorecer un lavado de sales más eficiente. Sin embargo, habría que hacerlo con precaución ya que esto tuvo consecuencias negativas en la calidad del fruto al mostrar el mayor nivel de manchas en la piel del fruto producidas por *Alternaria alternata*, durante dos de los tres años de ensayo, depreciando sensiblemente la cosecha.

Bibliografia

- Agustí, M. 2003. Citricultura. Eds. Mundi-Prensa. 422 pp.
- Alarcón, J.J., Domingo, R., Green, S.R., Sánchez-Blanco, M.J., Rodríguez, P. y Torrecillas, A. 2000. Sap flow as an indicator of transpiration and the water status of young apricot trees. *Plant and Soil*, 227 (1-2): 77–85.
- Ali, M.H. y Talukder, M.S.U. 2008. Increasing water productivity in crop production. A synthesis. *Agricultural Water Management*, 95: 1201-1213
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage, 56. FAO, Rome, Italy. 300pp.
- Ameglio, T., Minguéau, M., Archer, P. y Pons, B. 1992. Water relations in Halzenut: Sap flow, predawn water potential and micromorphometric variations of stem diameter. *III International Congress on Halzelhut*. Alba. Italy.
- Anderson, J.L., Richardson, E.A. y Kesner, C.D. 1986. Validation of chill unit and flower bud phenology models for ‘Montmorency’ sour cherry. *Acta Horticulturae*, 184: 71–78.
- Arbona, V., Iglesias, D.J., Jacas, J., Primo-Millo, E., Talon, M. y Gómez-Cadenas, A. 2005. Hydrogel substrate amendment alleviates drought effects on young citrus plants. *Plant and Soil*, 270: 73–82.
- Aussenac, G. y Valette, J.C. 1982. Summer water status of *Cedrus-Atlantica* Manetti, *Quercus-Ilex* L and *Quercus-Pubescens* Willd and of Some Pinetrees on the Mont-Ventoux. *Annales des Sciences Forestieres*, 39 (1): 41–62.
- Ayers, R.S. y Westcot, D.W. 1994. Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage, 29. FAO, Rome, Italy. 235 pp.
- Baille, M., Laury, J.G. y Baille, A. 1992. Some comparative results on evapotranspiration of greenhouse ornamental crops, using lysimeter, greenhouse H₂O balance and LVDT sensors. *Acta Horticulturae*, 304: 199–208.

- Bain, J.M. 1958. Morphological, anatomical and physiological changes in the developing fruit of the Valencia orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck). Australian Journal of Botany, 6: 1–24.
- Ballester, C., Castel, J. y Castel, J.R. 2008. Effects of regulated deficit irrigation on ‘Clementina de Nules’ and ‘Navel Lane Late’ citrus trees: growth, yield and fruit quality. *Proc 11th International Citrus Congress*, Wuhan, China. Oct 14–17, p. 74.
- Ballester, C., Castel, J. y Castel, J.R. 2009. Riego deficitario controlado en Clementina de Nules y Navel Lane Late: producción y calidad de la fruta. *VI Congreso Ibérico de Ciencias Hortícolas*, Logroño. Actas de Horticultura, 54: 101–102.
- Bañuls, J. y Primo-Millo, E. 1992. Effects of chloride and sodium on gas exchange parameters and water relations of Citrus plants. *Physiologia Plantarum*, 86: 115–123.
- Bañuls, J., Serna, M.D., Legaz, M. y Primo-Millo, E. 1997. Growth and gas exchange parameters of Citrus plants stressed with different salts. *Journal of Plant Physiology*, 150: 194–199.
- Behboudian, M.H., Törökfalvy, E. y Walker, R.R. 1986. Effects of salinity on ionic content, water relations and gas exchange parameters in some citrus scion-rootstock combinations. *Scientia Horticulturae*, 28: 105–116.
- Berger, A. y Selles, G. 1993. Diurnal fruit shrinkage: a model. *En: Borghetti, M., Grace, J. y Raschi, A. (eds). Water transport in plants under climatic stress*. Cambridge University Press. pp. 261–269.
- BOE. 2009. nº 300 de 14/12/2009, p. 105709–105710
- Bonet, L., Ferrer, P., Castel, J.R. e Intrigliolo, D.S. 2010. Soil capacitance sensors and stem dendrometers. Useful tools for irrigation scheduling of commercial orchards? *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8: 52–65.
- Boyer, J.S. 1968. Relationships of water potential to growth of leaves. *Plant Physiology*, 43: 1056–1062.

- Brown, R.W. 1976. New technique for measuring the water potential of detached leaf samples. *Agronomy Journal*, 68: 432–434.
- Brown, R.W. y Oosterhuis, D.M. 1992. Measuring plant and soil water potentials with thermocouple psychrometers. *Agronomy Journal*, 84: 78–86.
- Buendia, B., Allende, A., Nicolás, E., Alarcón, J.J. y Gil, M.I. 2008. Effect of regulated deficit irrigation and crop load on the antioxidant compounds of peaches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56 (10): 3601–3608.
- Cabello, M.J., Castellanos, M.T., Romojaro, F., Martínez-Madrid, C. y Ribas, F. 2009. Yield and quality of melon grown under different irrigation and nitrogen rates. *Agricultural Water Management*, 96: 866–874.
- Castel, J.R. y Fereres, E. 1982. Responses of young almond trees to two drought periods in the field. *Journal of Horticultural Science*, 57:175–187
- Castel, J.R. y Buj, A. 1990. Response of Salustiana oranges to high frequency deficit irrigation. *Irrigation Science*, 11: 121–127.
- Castel, J.R. y Buj, A. 1993. Riego por goteo deficitario en naranjos adultos ‘Salustiana’ durante 7 años. *Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetal*, 8 (2): 191–204.
- Cerdá, A., Nieves, M. y Guillén, M.G. 1990. Salt tolerance of lemon trees as affected by rootstock. *Irrigation Science*, 11: 245–249.
- Cermák, J., Kucera, J., Bauerle, W.L., Phillips, N. y Hinckley T.M. 2007. Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees. *Tree Physiology*, 27: 181–198.
- Chalmers, D.J., Mitchell, P.D. y Van Heek, L.A.G. 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 106: 307–312.
- Chalmers, D.J., Mitchell, P.D. y Jerie, P.H. 1984. The physiology of growth control of peach and pear trees using reduced irrigation. *Acta Horticulturae*, 146: 143–148.

- Chalmers, D.J., Burge, G., Jerie, P.H. y Mitchell, P.D. 1986. The mechanism of regulation of Bartlett pear fruit and vegetative growth by irrigation withholding and regulated deficit irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 111: 904–907.
- Chalmers, Y.M., Krstic, M.P., Downey, M.O., Loveys, B.R. y Dry, P.R. 2008. Impacts of sustained deficit irrigation on quality attributes and flavonoid composition of Shiraz grapes and wine. *Acta Horticulturae* 792: 163–169.
- Chapman, H. 1968. The mineral nutrition of citrus. Vol. 2. *En*: Reuther, W. (ed.) The citrus industry. University of California, Division of Agricultural Sciences, California, USA. pp. 127–289.
- Chaves, M.M., Harley, P.C., Tenhunen, J.D. y Lange, O.L. 1987. Gas exchange studies in two portuguese grapevine cultivars. *Physiologia Plantarum*, 70: 639–647.
- CHS. Confederación Hidrográfica del Segura. <http://www.chsegura.es>.
- Cicogna, A., Dietrich, S., Gani, M., Giovanardi, R. y Sandra, M., 2005. Use of meteorological radar to estimate leaf wetness as data input for application of territorial epidemiological model (downy mildew – *Plasmopara viticola*): agrometeorology 2003. *Physics and Chemistry of the Earth* 30: 201–207.
- Cochard, H., Forestier, S. y Ameglio, T. 2001. A new validation of the Scholander pressure chamber technique based on stem diameter variations. *Journal of Experimental Botany*, 52:1361–1365.
- Cohen, Y. 1991. Determination of orchard water requirement by a combined trunk sap flow and meteorological approach. *Irrigation Science*, 12: 93–98.
- Cohen, M., Ameglio, T., Cruiziat, P., Archer, P., Valancogne, C. y Ferré, L. 1993. Water consumption and optimization of the irrigation in orchards. *Acta Horticulturae*, 335: 349–357.
- Cohen, M., Goldhamer, D.A., Fereres, E., Girona, J. y Mata, M. 2001. Assessment of peach tree responses to irrigation water deficits by continuous monitoring

- of trunk diameter changes. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 76: 55–60.
- Commission Internationale de L'Eclairage. 1978. Recommendations on uniform color spaces color difference equations psychometric color terms. *Supplement 2. CIE Publ. 15 (E-1.3.1) 1971/ (TC-1.3). Bur. Centrale de la CIE*. Paris.
- Conejero, W., Alarcón, J.J., García-Orellana, Y., Abrisqueta, J.M. y Torrecillas, A. 2007a. Daily sap flow and maximum daily trunk shrinkage measurements for diagnosing water stress in early maturing peach trees during the post-harvest period. *Tree Physiology*, 27 (1): 81–88.
- Conejero, W., Alarcón, J.J., García-Orellana, Y., Nicolás, E. y Torrecillas, A. 2007b. Evaluation of sap flow and trunk diameter sensors used for irrigation scheduling in early maturing peach trees. *Tree Physiology*, 27: 1753–1759.
- Conejero, W. 2008. Programación del riego en melocotonero mediante el uso de sensores del diámetro del tronco. *Tesis doctoral*. Universidad Politécnica de Cartagena. 149 pp.
- Conejero, W., Ortuño, M.F., Mellisho, C.D. y Torrecillas, A. 2010. Influence of crop load on maximum daily trunk shrinkage reference equations for irrigation scheduling of early maturing peach trees. *Agricultural Water Management*, 97, 333–338.
- Cooley, N.M., Clingeleffer, P.R., Walker, R.R. y Glenn, D.M. 2008. The effects of water deficit and particle film technology interactions on Cabernet Sauvignon grape composition. *Acta Horticulturae*, 792: 193–200.
- Costello, M.J. 2008. Regulated deficit irrigation and density of *Erythroneura* spp. (*Hemiptera: Cicadellidae*) on grape. *Journal of Economic Entomology*, 101 (4): 1287–1294.
- Crisosto, C.H., Johnson, R.S., Luza, J.G. y Crisosto, G.M. 1994. Irrigation regimes affect fruit soluble solids concentration and rate of water loss of 'O'Henri peaches. *Hortscience*, 29: 1169–1171.

- Cuevas, J., Canete, M.L., Pinillos, V., Zapata, A.J., Fernandez, M.D., Gonzalez, M. y Hueso, J.J. 2007. Optimal dates for RDI in ‘Algerie’ loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl) cultivated in southeast Spain. *Agricultural Water Management*, 89: 131–136.
- Cuevas, J., Pinillos, V., Canete, M.L., Gonzalez, M., Alonso ,F., Fernandez, M.D. y Hueso, J.J. 2009. Optimal levels of postharvest deficit irrigation for promoting early flowering and harvest dates in loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl.). *Agricultural Water Management*, 96: 831–838.
- Cuevas, M.V., Torres-Ruiz, J.M., Álvarez, R., Jiménez, M.D., Cueva, J. y Fernández, J.E. 2010. Assessment of trunk diameter variation derived indices as water stress indicators in mature olive trees. *Agricultural Water Management*, 97: 1293–1302.
- Cui, N., Du, T., Kang, S., Li, F., Zhang, J., Wang, M. y Li, Z., 2008. Regulated deficit irrigation improved fruit quality and water use efficiency of pear-jujube trees. *Agricultural Water Management*, 95: 698–706.
- Daudet, F., Ameglio, T., Cochard, H., Archilla, O. y Lacoite, A. 2005. Experimental analysis of the role of water and carbon in tree stem diameter variations. *Journal of Experimental Botany*, 56 (409): 135–144.
- Dasberg, S., Bielorai, H., Haimowitz, A., y Erner, Y. 1991. The effect of saline irrigation water on “Shamouti” orange trees. *Irrigation Science*, 12: 205–211.
- Davies, W.J. y Zhang, J. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of Plant Physiology*, 42: 55–76.
- De la Rosa, J.M., Conesa, M.R., Domingo, R., Pagán, E., Corbalán, M., Pérez-Pastor, A. 2010. Estrategias de riego deficitario controlado en nectarino extratemprano. *X Simposium Hispano-Portugués de Relaciones Hídricas en las Plantas*. pp. 167–170.
- DeJong, T.M. 1986. Fruit effects on photosynthesis in *Prunus persica*. *Physiologia Plantarum*, 66:149–153

- Dichio, B., Xiloyannis, C., Sofo, A. y Montanaro, G. 2007. Effects of postharvest regulated deficit irrigation on carbohydrate and nitrogen partitioning, yield quality and vegetative growth of peach trees. *Plant and Soil*, 290 (1–2): 127–137.
- Doltra, J., Oncins, J.A., Bonany, J. y Cohen, M. 2007. Evaluation of plant-based water status indicators in mature apple trees under field conditions. *Irrigation Science*, 25: 351–359.
- Domingo, R. 1994. Respuesta del limonero Fino al riego deficitario controlado. Aspectos fisiológicos. *Tesis Doctoral*. Universidad de Murcia. 237 pp.
- Domingo, R., Ruiz-Sánchez, M.C., Sánchez-Blanco, M.J. y Torrecillas, A. 1996. Water relations, growth and yield of Fino lemon trees under regulated deficit irrigation. *Irrigation Science*, 16: 115–123.
- Domingo, R., Torrecillas, A., Guzmán, C.M., Martínez, B.M., Nicolás, E y Alarcón, J.J. 1999. Medida del flujo de savia en albaricoquero por el método de pulso de calor compensatorio. *XVII Congreso Nacional de Riegos*. Murcia. p. 128–134
- Domingo, R., Pérez-Pastor, A. y Ruiz-Sánchez, C. 2002. Physiological responses of apricot plants grafted on two different rootstocks to flooding conditions. *Journal of Plant Physiology*, 159 (7): 725–732.
- Domingo, R., Nortes, P.A., Egea, G., Torres, R. y Pérez Pastor, A. 2005. Utilización de sensores en planta para la programación del riego y uso eficiente del agua en la agricultura. *Vida Rural*, 217: 42–46
- Domingo, R. 2006. Riego deficitario controlado en frutales. Máster en Planificación y Gestión de Recursos Hídricos. pp. 523–528.
- Doorenbos, J. y Kasam, A.H. 1986. Yield response to Water. *FAO Irrigation and Drainage*, 33. FAO, Roma, 133 pp.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. 1977. Crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage*, 24. FAO, Roma, 144 pp.
- Dos Santos, T.P., Lopes, C.M., Rodrigues, M.L., de Souza, C.R., Ricardo-da-Silva, J.M., Maroco, J.P., Pereira, J.S. y Chaves, M.M. 2007. Effects of deficit

- irrigation strategies on cluster microclimate for improving fruit composition of Moscatel field-grown grapevines. *Scientia Horticulturae*, 112: 321–330.
- Duniway, J.M. 1971. Comparison of pressure chamber and thermocouple psychrometer determinations of leaf water status in tomato. *Plant Physiology*, 48: 106–107.
- Ebel, R.C., Proebsting, E.L. y Patterson, M.E. 1993. Regulated deficit irrigation may alter apple maturity, quality and storage life. *HortScience*, 28: 141–143.
- Ebel, R.C., Proebsting E.L. y Evans, R.G. 1995. Deficit irrigation to control vegetative growth in apple and monitoring fruit growth to schedule irrigation. *HortScience*, 30: 1229–1232.
- EEA. 2009a. CSI 018-Use of freshwater resources. European Environment Agency. Copenhagen. www.eea.europa.eu/es
- EEA. 2009b. Water resources across Europe — confronting water scarcity and drought. E.E.A. Report. N° 2/2009. EEA, Copenhagen. 60 pp. (ISSN 1725–9177)
- Egea, J., García, J.E., Egea, J., Berenguer, T., Gambín, M. y Patiño, J.L. 1985. Variedades de almendro de la Región de Murcia. CSIC-CEBAS. Murcia, 175 pp.
- Egea, J., Dicenta, F. y Berenguer, T. 2001. Antoñeta and Marta: Two new self-compatible late flowering almond cultivars. *En: CIHEAM. FAO. Univ.Harran (ed). XI GREMPA Seminar on pistachios and almonds. B.E. AK, Zaragoza, España*, pp. 365–367.
- Egea, G. 2008. Caracterización y modelización de la respuesta agronómica y fisiológica del almendro al riego deficitario. *Tesis doctoral*. Universidad Politécnica de Cartagena. 309 pp.
- Egea, G., Pagán, E., Baille, A., Domingo, R., Nortes, P.A. y Pérez-Pastor, A. 2009. Usefulness of establishing trunk diameter based reference lines for irrigation scheduling in almond trees. *Irrigation Science*, 27: 431–441.

- Egea, G., Nortes, P.A., González-Real, M.M., Baille, A. y Domingo, R. 2010. Agronomic response and water productivity of almond trees under contrasted deficit irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 97: 171–181.
- Egea, G., Dodd, I.C., González-Real, M.M., Domingo, R. y Baille, A. 2011. Partial rootzone drying improves almond tree leaf-level water use efficiency and afternoon water status compared with regulated deficit irrigation. *Functional Plant Biology*, 38: 372–385.
- Egea, G., Nortes, P.A., Domingo, R., Baille, A., Pérez-Pastor, A., González-Real, M.M. 2012. Almond agronomic response to long-term deficit irrigation applied since orchard establishment. *Irrigation science*, 1–10. *In press*.
- Ehrler, W.L., Idso, S.B., Jackson, R.D. y Reginato, R.J. 1978. Wheat canopy temperature: relation to plant water potential. *Agronomy Journal*, 70: 251–256.
- El-Ansary, D.O. y Okamoto, G. 2008. Improving table grape quality with less irrigation water in Japan: Partial root-zone drying versus regulated deficit irrigation. *Acta Horticulturae*, 792: 265–271.
- Elfving, D.C., Kauffmann, M.R. y Hall, A.E. 1972. Interpreting leaf water potential measurements with a model of the soil-plant-atmosphere continuum. *Physiologia Plantarum*, 27: 161–168.
- Embleton, T.W., Jones, W.W., Labonauskas, C.K y Reuther, W. 1973. Leaf analysis as a diagnostic tool and guide to fertilization. p. 183-210. *En* Reuther, W, Batchelor, LD, Webber, HJ (eds.). *The citrus industry*. Division of Agricultural Sciences, University of California. Berkeley, CA.
- English, M. 1990. Deficit irrigation. I. Analytical framework. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116: 399–412.
- Esparza, G., DeJong, T.M. y Weinbaum, S.A. 2001a. Effects of irrigation deprivation during the harvest period on nonstructural carbohydrate and nitrogen contents of dormant, mature almond trees. *Tree Physiology*, 21 (14): 1081–1086.

- Esparza, G., DeJong, T.M., Weinbaum, S.A y. Klein, I. 2001b. Effects of irrigation deprivation during the harvest period on yield determinants in mature almond trees. *Tree Physiology*, 21 (14): 1073–1079.
- FAO. 2007a. La agricultura y la escasez de agua: enfoque programático de la eficiencia en el uso del agua y la productividad agrícola. 20° período de sesiones, Comité de Agricultura, COAG/2007/7. Roma, Italia.
- FAO. 2007b. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Agricultura, 38. FAO. Roma, Italia.
- Farquhar, G.D. y Sharkey, T.D. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 33: 317–345.
- Felipe, A.J. 2000. El almendro. I. El material vegetal. Editorial Mira. 451 pp.
- Fereres, E., Cruz-Romero, G., Hoffman, G.J. y Rawlins, S.L. 1979. Recovery of orange trees following severe water stress. *Journal of Applied Ecology*, 16: 833–842.
- Fereres, E., Pruitt, W.O., Beutel, J.A., Henderson, D.W., Holzapfel, E., Schulbach, H. y Uriu, K. 1981. Evapotranspiration and drip irrigation scheduling. *En: Drip Irrigation Management*. Univ. California, Div. Agric. Sci., Davis. Ca. USA. pp. 8–13.
- Fereres, E. y Goldhamer, D. 1990. Irrigation of deciduous fruit and nut trees. *En: Irrigation of Agricultural Crops*. ASA Monograph No. 30. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. pp. 987–1017.
- Fereres, E. y Goldhamer, D.A. 2003. Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 78 (2): 139–144.
- Fereres, E., Goldhamer, D.A. y Parsons, L.R. 2003. Irrigation water management of horticultural crops. *Hortscience*, 38 (5): 1036–1042.
- Fereres, E. y Evans R. 2006. Irrigation of fruit trees and vines: an introduction. *Irrigation Science*, 24: 55–57.

- Fereres, E. y Soriano, M.A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58 (2): 147–159.
- Fernández, J.E. y Cuevas, M.V. 2010. Irrigation scheduling from stem diameter variations: a review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150: 135–151.
- Fisarakis, I., Chartzoulakis, K. y Stavrakas, D. 2001. Response of Sultana vines (*Vvinifera* L.) on six rootstocks to NaCl salinity exposure and recovery. *Agricultural Water Management* (51):13-27.
- Flore, J.A. y Layne, D.R. 1997. *Prunus*. En: Zamski E, Scheffler H (eds) Photoassimilates distribution in plants and crops: sink-source relationship. Marcel Dekker, New York, USA. pp 825–849.
- Frost, HB y Soost, RK. 1968. Seed reproduction: development of gametes and embryos. En: Reuther, L., Batchelor, D. Webber HJ (eds) *The citrus industry*, vol 2. University of California, California, USA. pp 290–324.
- Furr, J.R. 1955. Responses of citrus and dates to variations in soil moisture conditions at different seasons. *14th Int. Hort. Congress* 1: 400–412.
- García-Legaz, M.F., López-Gómez, E., Beneyto, J.M., Navarro, A. y Sánchez-Blanco, M.J. 2008. Physiological behaviour of loquat and anger rootstocks in relation to salinity and calcium addition. *Journal of Plant Physiology*, 165: 1049–1060.
- García-Lidón, A., Ortíz Marcide, J.M., García-Legaz, M.F. y Porras, I. 1992. Estudio comparativo de la floración en distintas variedades de limonero. *Fruits*, 47 (6): 661–666.
- García-Orellana, Y., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Conejero, W., Ortuño, M.F., Nicolás, E. y Torrecillas, A. 2007. Preliminary assessment of the feasibility of using maximum daily trunk shrinkage for irrigation scheduling in lemon trees. *Agricultural Water Management*, 89: 167–171.
- García-Sánchez, F., Carvajal, M., Porras, I. y Martínez, V. 2003. Effects of salinity and rate of irrigation on yield, fruit quality and mineral composition of ‘Fino 49’ lemon. *European Journal of Agronomy*, 19: 427–437.

- García-Sánchez, F., Botía, P., Fernández-Ballester, G., Cerdá, A. y Martínez-López, V. 2005. Uptake, transport, and concentration of chloride and sodium in three citrus rootstock seedlings. *Journal of Plant Nutrition*, 28: 1933–1945.
- García-Sánchez, F., Pérez-Pérez, J.G., Botía, P. y Martínez, V. 2006. The response of young mandarin trees grown under saline conditions depends on the rootstock. *European Journal of Agronomy*, 24: 129–139.
- García-Tejero, I. Romero-Vicente, R., Jiménez-Bocanegra, J.A. Martínez-García, G., Durán-Zuazo, V.H. y Muriel-Fernández, J.L. 2010. Response of citrus trees to deficit irrigation during different phenological periods in relation to yield, fruit quality, and water productivity. *Agricultural Water Management*, 97: 689–699.
- Gasque, M., Granero, B., Alós, M., Turégano, J.V. y González-Altozano, P. 2009. Resultados de la aplicación de riego deficitario controlado en cítricos de la variedad Navelina en 2007 y 2008. *Actas XXVII Congreso Nacional de Riegos*, Murcia. pp. 47–48.
- Gates, D.M. 1968. Transpiration and leaf temperature. *Annual Review of Plant Physiology*, 19: 211–238.
- Gebre, G.M. y Kuhns, M.R. 1992. Effects of water stress preconditioning on gas exchange and water relations of *Populus deltoides* clones. *Canadian Journal of Forest Research*, 23: 1291–1297.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Condori, O., Mamani, J., Miranda, R., Cusicanqui, J., Taboada, C. y Vacher, J. 2008. Could deficit irrigation be a sustainable practice for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the Southern Bolivian Altiplano? *Agricultural Water Management*, 95: 909–917.
- Geerts, S. y Raes, D. 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96: 1275–1284.
- Gelly, M., Recasens, I., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J., Girona, J. y Marsal, J., 2003. Effects of water deficit during stage II of peach fruit development and

- postharvest on fruit quality and ethylene production. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 78, 324–330.
- Gelly, M., Recasens, I., Girona, J., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J. y Marsal, J. 2004. Effects of stage II and postharvest deficit irrigation on peach quality during maturation and after cold storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84: 561–568.
- Génard, M., Fishman, S., Vercambre, G., Huguet, J.G., Bussi, C., Besset, J., Habib, R. 2001. A biophysical analysis of stem and root diameter variations in woody plants. *Plant Physiology*, 126 (1): 188–202.
- Ginestar, C. y Castel, J.R., 1996a. Response of young ‘Clementine’ citrus trees to water stress during different phenological periods. *Journal of Horticultural Science*, 71: 551–559.
- Ginestar, C. y Castel, J.R., 1996b. Utilización de dendrómetros como indicador de estrés hídrico en mandarinos jóvenes regados por goteo. *Riegos y Drenajes XXI*, N° 89, 40–46.
- Giorio, P., Sorrentino, G. y d’Andria, R. 1999. Stomatal behaviour, leaf water status and photosynthetic response in field-grown olive trees under water deficit. *Environmental and Experimental Botany*, 42: 95–104.
- Girona, J. 1992. Estrategias de riego deficitario en el cultivo del almendro. *Fruticultura Profesional*, 47: 38–45.
- Girona, J., Marsal, J., Cohen, M., Mata, M. y Miravete, C. 1993. Physiological, growth and yield responses of almonds (*Prunus dulcis* L.) to different irrigation regimes. *Acta Horticulturae*, 335: 389–398.
- Girona, J. 2002. Regulated deficit irrigation in peach. A global analysis. *Acta Horticulturae*, 592: 335–342.
- Girona, J., Mata, M. y Marsal, J. 2005a. Regulated deficit irrigation during the kernel-filling period and optimal irrigation rates in almond. *Agricultural Water Management*, 75: 152–167.

- Girona, J., Gelly, M., Mata, M., Arbonés, A., Rufat, J. y Marsal, J. 2005b. Peach tree response to single and combined deficit irrigation regimes in deep soils. *Agricultural Water Management*, 72: 97–108.
- Goldhamer, D.A. 1989. Drought Irrigation Strategies for Deciduous Orchards. *Cooperative Extensión*. University of California, Div. Agric. and Natural Resources. Publication nº 21453, 15 pp.
- Goldhamer, D.A. y Shackel, K.A. 1989. Irrigation cutoff and drought irrigation strategy effects on almond. *En: 17th Annual Almond Research Conference*. Modesto, 35–37.
- Goldhamer, D.A. 1996. Irrigation scheduling. *En: Micke, W. C. (ed). Almond production manual*. University of California. Division of agriculture and natural resources. pp. 171–178.
- Goldhamer, D.A. 1997. Regulated deficit irrigation of fruit and nut trees. *International Water & Irrigation Review*, 17: 14–19
- Goldhamer, D.A., 1999. Regulated deficit irrigation for California canning olives. *Acta Horticulturae*, 474 (1): 369–372.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., Mata, M., Girona, J. y Cohen, M., 1999. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *Journal of American Horticultural Science*, 124(4): 437–444.
- Goldhamer, D.A. y Salinas, M. 2000. Evaluation of regulated deficit irrigation on mature orange trees grown under high evaporative demand. *En: Proceedings of the Internaional Society of Citriculture, IX Congress. ISC, Orlando, FL*, 227–231.
- Goldhamer, D.A. y Viveros, M. 2000. Effects of preharvest irrigation cutoff durations and postharvest water deprivation on almond tree performance. *Irrigation Science*, 19 (3): 125–131.

- Goldhamer, D.A. y Fereres, E. 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science*, 20: 115–125.
- Goldhamer, D.A., Salinas, M., Crisosto, C., Day, K.R., Soler, M. y Moriana, A. 2002. Effects of regulated deficit irrigation and partial root zone drying on late harvest peach tree performance. *Acta Horticulturae*, 592: 343–350.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E y Salinas, M. 2003. Can almond trees directly dictate their irrigation needs? *California Agriculture*, 57(4): 138–144.
- Goldhamer, D.A. y Beede, R.H. 2004. Regulated deficit irrigation effects on yield, nut quality and water-use efficiency of mature pistachio trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 79 (4): 538–545.
- Goldhamer, D.A. y Fereres, E. 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science*, 23: 11–19.
- Goldhamer, D.A., Viveros, M. y Salinas, M. 2006. Regulated deficit irrigation in almonds: effects of variations in applied water and stress timing on yield and yield components. *Irrigation Science*, 24 (2): 101–114.
- Gomes-Laranjo, J., Coutinho, J.P., Galhano, V. y Cordeiro, V. 2006. Responses of five almond cultivars to irrigation: Photosynthesis and leaf water potential. *Agricultural Water Management*, 83 (3): 261–265.
- Gómez-Cadenas, A., Tadeo, F.R., Talon, M. y Primo-Millo, E. 1996. Leaf abscission induced by ethylene in water stressed intact seedlings of (*Citrus reshni* Hort. Ex Tan.) requires previous abscisic acid accumulation in roots. *Plant Physiology*, 112: 401–408.
- Gómez-Cadenas, A., Tadeo, F.R., Primo-Millo, E. y Talon, M. 1998. Involvement of abscisic and ethylene in the responses of Citrus seedlings to salt shock. *Physiologia Plantarum*, 103: 475–484.
- Gómez-Rico, A., Salvador, M.D., Moriana, A., Pérez, D., Olmedilla, N., Ribas, F. y Fregapane, G. 2007. Influence of different irrigation strategies in a traditional

- Cornicabra cv. olive orchard on virgin olive oil composition and quality. *Food Chemistry*, 100 (2): 568–578.
- González-Altozano, P. 1998. Riego deficitario controlado en Clementina de Nules: relaciones hídricas y respuesta agronómica. *Tesis doctoral*. Universidad Politécnica de Valencia. 173 pp.
- González-Altozano, P. y Castel, J.R. 1999. Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees. I. Yield and fruit quality effects. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 74: 706–713
- González-Altozano, P. y Castel, J.R. 2000a. Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees. II: Vegetative Growth. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 75: 388–392.
- González-Altozano, P. y Castel, J.R. 2000b. Effects of regulated deficit irrigation on 'Clementina de Nules' citrus trees growth, yield and fruit quality. *Acta Horticulturae*, 537: 749–758.
- González-Altozano, P. y Castel, J.R. 2003a. Riego deficitario controlado en 'Clementina de Nules'. I. Efectos sobre la producción y la calidad de la fruta. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 1:81–92.
- González-Altozano, P. y Castel, J.R. 2003b. Riego deficitario controlado en 'Clementina de Nules'. II. Efectos sobre el crecimiento vegetativo. *Spanish Journal of Agricultural Research* 1, 93–101.
- Goode, J.E. y Higgs, K.H. 1973. Water, osmotic and pressure potential relationships in apple leaves. *Journal of Horticultural Science*, 48:203–215.
- Goodwin, I. y Boland, A.M. 2002. Scheduling deficit irrigation of fruit trees for optimizing water use efficiency. *Deficit Irrigation Practices*. Water Reports Publication, n. 22, FAO, Roma, Italia. pp. 67–79.
- Granier, A. 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de seve brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestieres*, 42: 193–200.
- Granier, A. 1987. Evaluation of transpiration in a douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 3:309–319.

- Green, S.R. y Clothier, B.E. 1995. Root water uptake by kiwifruit vines following partial wetting of the root zone. *Plant and Soil*, 173: 317–328.
- Grossman, Y.L. y DeJong, T.M. 1994. PEACH: A simulation model of reproductive and vegetative growth in peach trees. *Tree Physiology*, 14:329–345.
- Guerrero, J., Moriana, A., Pérez-López, D., Couceiro, J.F., Olmedilla, N. y Gijón, M.C. 2006. Regulated deficit irrigation and the recovery of water relations in pistachio trees. *Tree Physiology*, 26 (1): 87–92.
- Guo, Y., Zhou, H. y Zhang, L. 2006. Photosynthetic characteristics and protective mechanisms against photooxidation during high temperature stress in two citrus species. *Scientia Horticulturae*, 108: 260–267.
- Harrison, R.D., Daniell, J.W. y Chesire, J.M. 1989. Net photosynthesis and stomatal conductance of peach seedlings and cuttings in response to changes in soil water potential. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 114: 986–990.
- Henson, I.E., Alagarwamy, G., Bidinger, F.R. y Mahalakshmi, V. 1982. Stomatal responses of pearl millet (*Pennisetum americanum* L. Leeke) to leaf water status and enviromental factors in the field. *Plant Cell and Environment*, 5: 64–74.
- Higgins, S.S., Larsen, F.E., Bendel, R.B., Radamaker, G.K., Bassman, J.H., Bidlake, W.R. y Al Wir, A. 1992. Comparative gas exchange characteristics of potted, glasshouse-grown almond, apple, fig, grape, olive, peach and Asian pear. *Scientia Horticulturae*, 52: 313–329.
- Hiler, E.A., Howell, T.A., Lewis, R.B. yBoos, R.P. 1974. Irrigation timing by the stress day index method. *Trans. ASAE* 17: 393–398.
- Hinckley, T.M. y Bruckerhoff, D.N. 1975. The effects of drought on water relations and stem shrinkage of *Quercus alba*. *Canadian Journal of Botany*, 53: 62–72.
- Howie, H. y Lloyd, J. 1989. Response of orchard "Washington Navel, orange (*Citrus sinensis* L. osbeck) to saline irrigation water. II. Flowering, fruit set and fruit growth. *Australian Journal of Agricultural Research*, 40: 371–80.

- Hsiao, T.C. 1973. Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 24: 519–570.
- Hsiao, T.C. y Bradford, K.J. 1983. Physiological consequences of cellular water deficits. *En: Taylor, H. M., Jordan, W. R. y Sinclair, T. R. (eds). Limitations to efficient water use in crop production. Madison, WI: ASA, CSSA, SSSA, pp. 227–265.*
- Hsiao, TC. 1990. Measurements of plant water status. In *Irrigation of Agricultural Crops*. Eds. B A Steward y D R Nielsen. American Society of Agronomy, Madison, Wis, USA. pp. 243–279.
- Hsiao, T., Steduto, P. y Fereres, E., 2007. A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. *Irrigation Science*, 25: 209–231.
- Hueso, J. y Cuevas, J. 2008. Loquat as a crop model for successful deficit irrigation. *Irrigation Science*, 26: 269–276.
- Huguet, J.G. 1985. Appréciation de l'état hydrique d'une plante à partir des variations micrométriques de la dimension des fruits ou des tiges au cours de la journée. *Agronomie* 5: 733–741.
- Huguet, J.G., Li, S.H. y Defrance, H. 1990a. Influence de la disponibilité en eau du sol sur la qualité des fruits chez le pêcher *Prunus persica* L. 9^o Colloque sur les Recherches Fruitières. Avignon. pp. 135–144.
- Huguet, J.G., Li, S.H., Lorendeau, J.Y. y Pelloux, G. 1990b. Utilisation de la micromorphometrie sur arbres fruitiers pour le contrôle de l'état hydrique et le pilotage de l'irrigation. *Le Fruit Belge*, 431: 186–198.
- Huguet, J.G., Li, S.H., Lorendeau, J.Y. y Pelloux, G. 1992. Specific micromorphometric reactions of fruit-trees to water-stress and irrigation scheduling automation. *Journal of Horticultural Science*, 67(5): 631–640.
- Hutmacher, R.B., Nightingale, H.I., Rolston, D.E., Biggar, J.W., Dale, F., Vail, S.S. y Peters, D. 1994. Growth and yield responses of almond (*Prunus amygdalus*) to trickle irrigation. *Irrigation Science*, 14 (3): 117–126.

- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J. y Hatfield, J.L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24: 45–55.
- Iglesias, D.J., Lliso, I., Tadeo, F.R. y Talón, M. 2002. Regulation of photosynthesis through source: sink imbalance in citrus is mediated by carbohydrate content in leaves. *Physiologia Plantarum*, 116: 563–572.
- Iniesta F., Testi L., Orgaz F. y Villalobos F.J. 2009. The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees. *European Journal of Agronomy*, 30: 258–265.
- Intrigliolo D.S. y Castel, J.R. 2004. Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrigation Science*, 23: 93–102.
- Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2005. Effects of regulated deficit irrigation on growth and yield of young Japanese plum trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 80: 177–182.
- Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2006. Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in plum. *Agricultural Water Management*, 83 (1-2): 173–180.
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. 2007. Crop load affects maximum daily trunk shrinkage of plum trees. *Tree Physiology*, 27: 89–96.
- Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R., 2007b. Evaluation of grapevine water status from trunk diameter variations. *Irrigation Science*, 26: 49–59.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J. y Pinter, P.J. 1981. Canopy temperature as a drought stress indicator. *Water Resources Research*, 17: 1133–1138.
- Jackson, R.D. 1982. Canopy temperature and crop water stress. *Advances in Irrigation Research*, 1: 43–85.
- Jiménez-Cuesta, M., Cuquerella, J. y Martínez-Jávega, J.M. 1981. Determination of a color index for citrus fruit degreening. *Proceedings International Society of Citriculture*, 2: 750–753.

- Johnsson, H. y Jansson, P. 1991. Water balance and soil moisture dynamics of field plots with barley and grass. *Journal of Hidrology*, 129: 149–173.
- Johnson, R.S. y Phene B.C. 2008. Fruit quality disorders in an early maturing peach cultivar caused by postharvest water stress. *Acta Horticulturae*, 792: 385–390.
- Jones, H.G. 1983. Estimation of an effective soil water potential at the root surface of transpiring plants. *Plant, Cell and Environment*, 6: 671–674.
- Jones, H.G. 1990. Physiological aspects of the control of water status in horticultural crops. *HortScience*, 25: 19–26.
- Jones, H.G. 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55 (407): 2427–2436.
- Jones, H. 2007. Monitoring plant and soil water status: established and novel revisited and their relevance to studies of drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 58 (2): 119–130.
- Jordan, W.R. 1970. Growth of cotton seedlings in relation to maximum daily plant-water potential. *Agronomy Journal*, 62: 699–701.
- Kilili, W., Behboudian, M.H. y Mill, T.M. 1996. Postharvest performance of “Braeburn” apples in relation to withholding of irrigation at different stages of the growing season. *Journal Horticultural Science*, 71: 693–701.
- Klepper, B. 1968. Diurnal pattern of water potential in woody plants. *Plant Physiology*, 43: 1931–1934.
- Klepper, B., Browning, V.D. y Taylor, H.M. 1971. Stem diameter in relation to plant water status. *Plant Physiology*, 48: 683–685.
- Knipling, E.B. 1967. Measurement of leaf water potential by the dye method. *Ecology*, 48: 1038–1041.
- Kozlowski, T.T. y Winget, C.H. 1964. Diurnal and seasonal variation in radii of tree stems. *Ecology*, 45: 149–155.
- Kozlowski, T.T. 1967. Diurnal variations in stem diameters of small trees. *Botanical Gazette*, 128 (1): 60–65.

- Lakso, A.N., Geyer, A.S. y Carpenter, S.G. 1984. Seasonal osmotic relations in apple leaves of different ages. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 109: 544–547.
- Lampinen, B., Shackel, K.A., Southwick, S., Olson, B., Yeager, J. y Goldhamer, D.A. 1995. Sensitivity of yield and fruit quality of French prune to water deprivation at different fruit growth stages. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 120: 139–147.
- Léchaudel, M., Vercambre, G., Lescourret, F., Norman, F. y Génard, M., 2007. An analysis of elastic and plastic fruit growth of mango in response to various assimilates supplies. *Tree Physiology*, 27: 219–230.
- Levy, Y., Shalhevet, J. y Bielorai, H. 1979. Effect of irrigation regime and water salinity on grapefruit quality. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 104: 356–359.
- Li, S.H., Huguet, J.G., Schoch, P.G. y Orlando, P. 1989. Response of peach tree growth and cropping to soil water deficit at various phenological stages of fruit development. *Journal of Horticultural Science*, 64: 541–552.
- Link, S.O., Thied, M.E. y Van Bavel, M.G. 1998. An improved strain-gauge device for continuous field measurement of stem and fruit diameter. *Journal of Experimental Botany*, 49 (326): 1583–1587.
- Lloyd, J., Kriedemann, P.E. y Syvertsen, J.P. 1987a. Gas exchange, water relations and ion concentrations of leaves on salt-stressed Valencia orange *Citrus sinensis* (L.) Osbeck. *Australian Journal of Plant Physiology*, 14: 387–396.
- Lloyd, J., Syvertsen, J.P. y Kriedemann, P.E. 1987b. Salinity effects on leaf water relations and gas exchange of Valencia orange, *Citrus sinensis* (L.) Osbeck, on rootstocks with different salt exclusion characteristics. *Australian Journal of Plant Physiology*, 14: 605–617.
- Lloyd, J. y Howie, H. 1989. Salinity, stomatal responses and whole-tree hydraulic conductivity of orchard ‘Washington Navel’ orange, *Citrus sinensis* (L.) *Australian Journal of Plant Physiology*, 16: 169–179.

- Lloyd, J. y Howie, H. 1989. Response of orchard 'Washington navel orange', *Citrus sinensis* (L.) Osbeck to saline irrigation water I. Canopy characteristics and seasonal patterns in leaf osmotic potential, carbohydrates and ion concentrations. *Australian Journal of Agricultural Research*, 40: 359–369.
- Lloyd, J., Kriedemann, P. y Aspinall, D. 1989. Comparative sensitivity of Prior Lisbon lemon and Valencia orange trees to foliar sodium and chloride concentrations. *Plant Cell and Environment*, 12: 529–540.
- Lloyd, J., Kriedemann, P. y Aspinall, D. 1990. Contrasts between Citrus species in response to salinisation: An analysis of photosynthesis and water relations for different rootstock-scion combinations. *Physiologia Plantarum*, 78: 236–246.
- Loveys, B.R., Stoll, M y. Davies, W.J. 2004. Physiological approaches to enhance water use efficiency in agriculture: Exploiting plant signalling in novel irrigation practice. *En: Bacon MA, ed. Water Use Efficiency in Plant Biology*. Blackwell Publishing, UK. pp. 113–141.
- Ma, F.S., Kang, S.Z., Li, F.S., Wang, M.X., Pang, X.M., Wang, J.F. y Li, Z.J., 2006. Effect of regulated deficit irrigation on water use efficiency and fruit quality of pear jujube tree in greenhouse. *Trans. CSAE* 22 (1), 37–43.
- Maas, E.V. 1993. Salinity and citriculture. *Tree Physiology*, 12: 195-216.
- Maas, E.V. y Hoffman, G.J. 1977. Crop salt tolerance - Current assessment. *J. Irrigation and Drainage Division, ASCE* 103(IRZ): 115–134. Proceeding Paper 12993.
- Maotani, T. y Machida, Y. 1977. Studies on leaf water stress in fruit trees. VII. Effects of summer water potential on Satsuma mandarin trees on fruit characteristics at harvest time. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 46: 145–152.
- MAPA. 2001. Plan Nacional de Regadíos. Horizonte 2008. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 357 pp. (ISBN: 84-491-0501-3)
- Marcilla, A., Zarzo, M. y Del Río, M.A. 2006. Effect of storage temperatura on the flavour of citrus fruit. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 4: 336–344.

- Marsal, J., Girona, J. y Mata, M. 1997. Leaf water relation parameters in almond compared to hazelnut trees during a deficit irrigation period. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 122: 582–587.
- Marsal, J., Gelly, M., Mata, M., Arbonés, A. y Girona, J. 2002. Phenology and drought affects the relationship between daily trunk shrinkage and midday stem water potential of peach trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 77: 411–417.
- Marshall, D.C. 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology*, 33: 385–396.
- McCracken, I. y Kozlowski, T.T. 1965. Thermal contraction in twigs. *Nature*, 208: 910.
- McCutchan, H. y Shackel, K.A. 1992. Stem water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117: 607–611.
- McGowan, M. y Willians, J.B. 1980. The water balance of an agricultural catchment. *Journal of Soil Science*, 31: 217–262.
- Medina, C.L., Machado, E.C. y Gomes, M.M.A. 1999. Conductancia estomática transpiração e fotossíntese em laranjeira Valencia sob deficiência hídrica. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, 11(1): 29–34.
- Meinzer, F.C., Clearwater, M.J. y Goldstein, G. 2001. Water transport in trees: current perspectives, new insights and some controversies. *Environmental and Experimental Botany*, 45: 239–262.
- Mitchell, P.D. y Chalmers, D.J. 1982. The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 107: 853–856.
- Mitchell, P.D., Jerie, P.H. y Chalmers, D.J. 1984. The effects of regulated water deficits on pear tree growth, flowering, fruit growth and yield. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 109: 604–606.

- Mitchell, P.D., Vandenende, B., Jerie, P.H. y Chalmers, D.J. 1989. Responses of Bartlett pear to withholding irrigation, regulated deficit irrigation, and tree spacing. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 114 (1): 15–19.
- Mohsenin, N. 1970. *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach Science Publishers. New York, pp.897
- Moreno, F., Fernández, J.E., Clothier, B.E. y Green, S. R. 1996. Transpiration and root water uptake by olive trees. *Plant and Soil*, 184: 85–96.
- Moreno, F., Conejero, W., Martín-Palomo, M.J., Girón, I.F. y Torrecillas, A. 2006. Maximum daily trunk shrinkage reference values for irrigation scheduling in olive trees. *Agricultural Water Management*, 84: 290–294.
- Moreshet, S. y Green, G.C. 1984. Seasonal trends in hydraulic conductance of field-grown ‘Valencia’ orange trees. *Scientia Horticulturae*, 23: 169–80.
- Moriana, A. y Fereres, E., 2002. Plant indicators for scheduling irrigation of young olive trees. *Irrigation Science*, 21: 83–90.
- Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M. y Fereres, E. 2003. Yield responses of mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 123 (3): 425–431.
- Moriana, A. y Fereres, E. 2004. Establishing reference values of trunk diameter fluctuations and stem water potential for irrigation scheduling of olive trees. *Acta Horticulturae*, 664: 407–412.
- Moriana, A., Pérez-López, D., Gómez-Rico, A., Salvador, M.D., Olmedilla, N., Ribas, F. y Fregapane, G. 2007. Irrigation scheduling for traditional, low density olive orchards: water relations and influence on oil characteristics. *Agricultural Water Management*, 87 (2): 171–179.
- Moughetih, M.J., El-Ashram, M., Amerhom, G. y Madbouly, W., 1977. Effect of different rates of irrigation on Navel orange trees. II. Yield and fruit quality. *Annals of Agricultural Science Moshatohor*, 8: 119–127.

- Mpelasoka, B.S., Behboudian, M.H. y Mills, T.M. 2001. Water relations, photosynthesis, growth, yield and fruit size of 'Braeburn' apple: Responses to deficit irrigation and to crop load. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 76: 150–156.
- Mpelasoka, B.S. y Behboudian, M.H., 2002. Production of aroma volatiles in response to deficit irrigation and to crop load in relation to fruit maturity for 'Braeburn' apple. *Postharvest Biology and Technology*, 24: 1–11.
- Myers, B.J. 1988. Water stress integral-a link between short-term stress and long-term growth. *Tree Physiology*, 4: 315–323.
- Naor, A., Klein, I., Doron, I., Gal, Y., Ben-David, Z. y Bravdo, B. 1997. The effect of irrigation and crop load on stem water potential and Apple fruit size. *Journal of Horticultural Science*, 72: 765–771.
- Naor, A. y Cohen, S. 2003. Sensitivity and Variability of Maximum Trunk Shrinkage, Midday Stem Water Potential, and Transpiration Rate in Response to Withholding Irrigation from Field-grown Apple Trees. *HortScience*, 38: 547–551.
- Naor, A., Stern, R., Peres, M., Greenblat, Y., Gal, Y. y Flaishman, M.A. 2005. Timing and severity of postharvest water stress affect following-year productivity and fruit quality of field-grown 'Snow Queen' nectarine. *Journal of the American Society For Horticultural Science*, 130 (6): 806–812.
- Naor, A. 2006. Irrigation scheduling of peach. Deficit irrigation at different phenological stages and water stress assessment. *Acta Horticulturae*, 713: 339–349.
- Naor, A., Stern, R., Flaishman, M., Gal, Y. y Peres, M. 2006. Effects of postharvest water stress on autumnal bloom and subsequent-season productivity in mid-season 'Spadona' pear. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 81 (3): 365–370.
- Nortes, P.A., Pérez-Pastor, A., Egea, G., Conejero, W. y Domingo, R. 2005. Comparison of changes in stem diameter and water potential values for

- detecting water stress in young almond trees. *Agricultural Water Management*, 77: 296–307.
- Nortes, P. 2008. Respuesta Agronómica y Fisiológica del Almendro al Riego Deficitario. Indicadores de Estrés Hídrico. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Cartagena. 194 pp.
- Nortes, P.A., González-Real, M.M., Egea, G. y Baille, A. 2009. Seasonal effects of deficit irrigation on leaf photosynthetic traits of fruiting and non-fruiting shoots in almond trees. *Tree Physiology*, 29:375–388.
- Obenland, D., Collin, S., Sievert, J., Fjeld, K., Doctor, L. y Arpaia, M.L. 2008. Commercial packing and storage of navel oranges alters aroma volatiles and reduces flavor quality. *Postharvest Biology and Technology*, 47: 159–167.
- Oppenheimer, H.R. y Elze, D.L. 1941. Irrigation of citrus trees according to physiological indicators. *Rehovoth Agr. Res. Sta., Bull.* 31.
- Orgaz, F. y Fereres, E. 2004. Riego. *En*: Barranco, D., Fernández-Escobar, R., Rallo, L. (Eds.), *El cultivo del olivo*. Mundi Prensa, Madrid, pp. 323–346.
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E. y Torrecillas, A. 2004. Interpreting trunk diameter changes in young lemon trees under deficit irrigation. *Plant Science*, 167: 275–280.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., y Torrecillas, A. 2006a. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow, and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Tree*, 20: 1–8.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Mounzer, O., Alarcón, J.J. y Torrecillas, A. 2006b. Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees. *Plant and Soil*, 279: 229–242.
- Ortuño, M.F., Brito, J.J., García-Orellana, Y., Conejero, W. y Torrecillas, A. 2009a. Maximun daily trunk shrinkage and stem water potential baselines for irrigation scheduling of lemon trees. *Irrigation Science*, 27: 121–127.

- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Pérez-Sarmiento, F. y Torrecillas, A. 2009b. Assessment of maximum daily trunk shrinkage signal intensity threshold values for deficit irrigation in lemon trees. *Agricultural Water Management*, 96: 80–86.
- Ortuño, M.F., Brito, J.J., Conejero, W., García-Orellana, Y., Torrecillas, A. 2009c. Using continuously recorded trunk diameter fluctuations for estimating water requirements of lemon trees. *Irrigation Science*, 27: 271–276.
- Ortuño, M.F., Conejero, W., Moreno, F., Moriana, A., Intrigliolo, D.S., Biel, C., Mellisho, C.D., Pérez-Pastor, A., Domingo, R., Ruiz-Sánchez, M.C., Casadesus, J., Bonany, J. y Torrecillas, A. 2010. Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives. *Agricultural Water Management*, 97: 1–11.
- Pagán, E., Pérez-Pastor, A., Domingo, R., Robles, J.M., Nortes, P.A., Egea, G., Botía, P., García-Oller, I., Porras, I. y Caro, M. 2006. Effects of regulated deficit irrigation on trunk and fruit growth in Fortune mandarin. *Bibliotheca Fragmenta agronómica*, 11: 695–696.
- Pagán, E., Pérez-Pastor, A., Domingo, R., Conesa, M.R., Robles, J.M., Botía, P., García-Oller, I., Caro, M. 2008. Feasibility study of the maximum daily trunk shrinkage for scheduling mandarin trees irrigation. *Italian Journal of Agronomy*, 3: 691–692.
- Pagán E., Pérez-Reverte, R., Provencio, A.B., Robles, J.M., Fernández-Trujillo, J. P., Domingo, R., Pérez-Pastor, A. 2009. Regulated deficit irrigation in 'Fortune' mandarin trees improves the fruit quality at harvest and during storage. *II International Citrus Biotechnology Symposium*. Catania (Italia).
- Papadakis, I.E., Dimassi, K.N., Bosabalidis, A.M., Therios, I.N., Patakas A. y Giannakoula, A. 2004. Effects of B excess on some physiological and anatomical parameters of 'Navelina' orange plants grafted on two rootstocks. *Environmental and Experimental Botany*, 51: 247–257.

- Parlange, J.Y., Turner, N.C. y Waggoner, P.E. 1975. Water uptake, diameter change and non-linear diffusion in tree stems. *Plant Physiology*, 55: 247–250.
- Pavel, E.W. y Fereres, E. 1998. Low soil temperatures induce water deficits in olive (*Olea europaea*) trees. *Physiologia Plantarum*, 104: 525–532.
- Peng, Y.H. y Rabe, E., 1998. Effect of differing irrigation regimes on fruit quality, yield, fruit size and net CO₂ assimilation of Mihowase Satsuma. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 73: 229–234.
- Pereira, L.S., Oweis, T. y Zairi, A., 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management*, 57: 175–206.
- Pérez-Pastor, A., Ruiz-Sánchez, M.C., Martínez, J.A., Nortes, P.A., Artés, F. y Domingo, R. 2007. Effect of deficit irrigation on apricot fruit quality at harvest and during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87: 2409–2415.
- Pérez-Pastor, A., Domingo, R., Torrecillas, A., Ruiz-Sánchez, M.C. 2009a. Response of apricot trees to deficit irrigation strategies. *Irrigation Science*, 27: 231–242.
- Pérez-Pastor, A., Pagán, E. y Domingo, R. 2009b. The usefulness of the maximum daily trunk shrinkage to schedule deficit irrigation in almond trees. *Interdrought III. The 3rd International Conference on Integrated Approaches to Sustain and Improve Plant Production Under Drought Stress*. Shanghai (China).
- Pérez Pérez, J.G. 2005. Influencia del patrón en la respuesta al estrés hídrico en cítricos. Aspectos fisiológicos y agronómicos. *Tesis doctoral*. Universidad Miguel Hernández de Elche. 258 pp.
- Pérez-Pérez, J.G., Romero, P. y Navarro, J.M. 2008a. Response of sweet orange cv Lane late to deficit irrigation in two rootstocks. I: water relations, leaf gas exchange and vegetative growth. *Irrigation Science*, 26: 415–425.
- Pérez-Pérez, J.G., Romero, P., Navarro, J.M. y Botía, P. 2008b. Response of sweet orange cv Lane late to deficit-irrigation strategy in two rootstocks. II:

- Flowering, fruit growth, yield and fruit quality. *Irrigation Science*, 26: 519–529.
- Pérez-Pérez, J.G., Robles, J.M. y Botía, P. 2009. Influence of deficit irrigation in phase III of fruit growth on fruit quality in ‘lane late’ sweet orange. *Agricultural Water Management*, 96: 969–974.
- Perez-Sarmiento, F., Alcobendas, R., Mounzer, O., Alarcón, J.J. y Nicolás, E. 2010. Effects of regulated deficit irrigation on physiology and fruit quality in apricot trees. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8: 86–94.
- Post, S.E.C. y Sakovich, N.J. 1986. A promising new tool in irrigation management. *Cal. Citrograph*, 7: 124.
- Prichard, T.L., Asai, W., Verdegaa, P., Micke, W. y Fuson, K. 1992. Effects of water supply and irrigation strategies on almonds. *En: Proc. 20th Annual Almond Research Conference*. Almond Board of California, Sacramento, 60–63.
- Puerto, P., Domingo, R., Solano, F.J., García, M., Pérez-Pastor, A., Torres, R. 2010. Efecto de la carga productiva sobre las relaciones hídricas del almendro. *X Simposium Hispano-Portugués de Relaciones Hídricas en las Plantas*. Cartagena (España).
- Ragab, R., 1996. Constraints and applicability of irrigation scheduling under limited water resources, variable rainfall and saline conditions. *En: FAO (ed.), Irrigation Scheduling: from Theory to Practice*. Rome, Italy, pp. 149–165.
- Raghuwanshi, N.S. y Wallender, W.W., 1997. Field-measured evapotranspiration as a stochastic process. *Agricultural Water Management*, 32: 111–129.
- Rapisarda, P., Lo Bianco, M., Pannuzzo, P. y Timpanaro, N. 2008. Effect of cold on vitamin C, phenolics and antioxidant activity of five orange genotypes (*citrus sinensis* (L.) Osbeck). *Postharvest Biology and Technology*, 49: 348–354.
- Raskin, P., Gleick, P.H., Kirshen, P., Pontius, R.G. y Strzepek, K., 1997. Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world. Stockholm Environmental Institute, Sweden. Document prepared for the

- fifth session of the United Nations Commission on Sustainable Development.
- Raveh, E., Cohen, S., Raz, T., Yakir, D., Grava, A. y Goldschmidt, E.E. 2003. Increased growth of young citrus trees under reduced radiation load in a semi-arid climate. *Journal Experimental Botany*, 54 (381): 365–373.
- Reglamento (CE) No 1221/2008 Normas de Comercialización de frutas y hortalizas.
- Remorini, D. y Massai, R. 2003. Comparison of water status indicators for young peach trees. *Irrigation Science*, 22: 39–46.
- Renquist, R., 1987. Evapotranspiration calculations for young peach trees and growth responses to irrigation amount and frequency. *HortScience*, 22: 221–223.
- Richardson, E.A., Seeley, S.D., Walker, D.R., Anderson, J.L. y Ashcroft, G.L. 1975. Pheno-climatography of Spring Peach Bud Development. *HortScience*, 10 (3): 236–237.
- Richardson, E.A., Anderson, J.L., Hatch, A.H. y Seeley, S.D. 1982. ASYMCUR, an asymmetric curvilinear fruit tree model. *XXIst International Hort. Cong. Abstr. II*: 2078.
- Ritchie, G.A. y Hinckley, T.M. 1975. The pressure chamber as an instrument for ecological research. *Advances in ecological research*, 9: 165–254.
- Romero, P. 2002. Respuesta del almendro (cv. Cartagenera) al riego deficitario controlado en condiciones de riego subterráneo. *Tesis doctoral*. Universidad de Murcia. 288 pp.
- Romero, P., Botía, P. García, F. 2004a. Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on water relations of mature almond trees. *Plant and Soil*, 260 (1-2): 155–168.
- Romero, P., Botía, P. y García, F. 2004b. Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on vegetative development and yield of mature almond trees. *Plant and Soil*, 260: 169–181.

- Romero, P. y Botía, P. 2006. Daily and seasonal patterns of leaf water relations and gas exchange of regulated deficit-irrigated almond trees under semiarid conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 56 (2): 158–173.
- Romero, P., Navarro, J.M., Pérez-Pérez, J.G., García-Sánchez, F., Gómez-Gómez, A., Porras, I., Martínez, V. y Botía, P. 2006. Deficit irrigation and rootstock: their effects on water relations, vegetative development, yield, fruit quality and mineral nutrition of *Clemenules* mandarin. *Tree Physiology*, 26: 1537–1548.
- Romero-Aranda, R., Moya, J.L., Tadeo, F.R., Legaz, F., Primo-Millo, E. y Talón, M. 1998. Physiological and anatomical disturbances induced by chloride salts in sensitive and tolerant citrus: beneficial and detrimental effects of cations. *Plant, Cell and Environmental*, 21: 1243–1253.
- Rosati, A., Metcalf, S.G., Buchner, R.P., Fulton, A.E. y Lampinen, B.D. 2006. Physiological effects of kaolin applications in well-irrigated and waterstressed walnut and almond trees. *Annals of Botany*, 98 (1): 267–275.
- Ruiz, D., Martínez, V. y Cerdá, A. 1999. Demarcating specific ion (NaCl, Cl⁻, Na⁺) and osmotic effects in the response of two citrus rootstocks to salinity. *Scientia Horticulturae*, 80: 213–224.
- Ruiz-Sánchez, M.C. y Girona, J. 1995. Investigaciones sobre riego deficitario controlado en melocotonero. *En: Riego deficitario controlado, Fundamentos y aplicaciones*. Eds Mundi-Prensa, Madrid, España, pp. 67–95.
- Ruiz-Sánchez, M.C., Domingo, D., Morales, D. y Torrecillas, A. 1996. Water relations of Fino lemon plants on two rootstocks under flooded conditions. *Plant Science*, 120: 119–125.
- Ruiz-Sánchez, M.C., Domingo, R., Savé, R., Biel, C. y Torrecillas, A. 1997. Effects of water stress and rewatering on leaf water relations of lemon plants. *Biologia Plantarum*, 39 (4): 623–631.
- Ruiz-Sánchez, M.C., Egea, J., Galego, R. y Torrecillas, A. 1999. Floral biology of 'Bulida' apricot trees subjected to postharvest drought stress. *Annals of Applied Biology*, 135: 523–528.

- Ruiz-Sánchez, M.C., Torrecillas, A., Pérez-Pastor, A., Domingo, R. 2000. Regulated deficit irrigation in apricot trees. *Acta Horticulturae*, 537:759–766.
- Ruiz-Sánchez, M.C., Domingo, R. y Pérez-Pastor, A. 2007. Daily variations in water relations of apricot trees under different irrigation regimes. *Biologia Plantarum*, 51, 735–740.
- Ruiz-Sánchez, M., Domingo, R. y Castel, J. 2010. Review. Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8: 5–20.
- Sánchez-Blanco, M.J., Torrecillas, A., León, A. y Del Amor, F. 1989. The effect of different irrigation treatments on yield and quality of Verna lemon. *Plant and Soil*, 120: 299–302.
- Sánchez-Blanco, M.J., Torrecillas, A., Del Amor, F. y León, A. 1990. The water relations of Verna lemon trees from flowering to the end of rapid fruit growth. *Biologia Plantarum*, 32: 357–363.
- Sánchez-Blanco, M.J., Alarcón, J.J., Planes, J. y Torrecillas, A. 1994. Differential flood stress resistance of two almond cultivars based on survival, growth and water relations as stress indicators. *Journal of Horticultural Science*, 69: 947–953.
- Sánchez-Blanco, M.J. y Torrecillas, A. 1995. Aspectos relacionados con la utilización de estrategias de riego deficitario controlado en cultivos leñosos. *En: Riego Deficitario Controlado. Fundamentos y Aplicaciones. Colección Cuadernos VALUE 1. Mundi Prensa/Unión Europea*. pp. 43–63.
- Sarwar, A. y Bastiaanssen, W.G.M. 2001. Long-term effects of irrigation water conservation on crop production and environment in semiarid areas. *Journal. Irrigation Drainage, ASCE*, 127: 331–338.
- Savé, R. y Serrano, L. 1986. Some physiological and growth responses of Kiwi fruit (*Actinidia chinensis*) to flooding. *Physiologia Plantarum*, 66: 75–78.
- Schirra, M. y D'hallewin, 1997. Storage performance of 'Fortune' mandarins following hot water dips. *Postharvest Biology and Technology*, 10: 229–238.

- Scholander, P.F., Hammel, H.T., Bradstreet, E.D. y Hemingsen, E.A. 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science* 148, 339–346.
- Shackel, K.A., Ahmadi, H., Biasi, W., Buchner, R., Goldhamer, D., Gurusinghe, S., Hasey, J., Kester, D., Krueger, B., Lampinen, B., McGourty, G., Micke, W., Mitcham, E., Olson, B., Pelletrau, K., Philips, H., Ramos, D., Schwankl, L., Sibbett, S., Southwick S., Stevenson, M., Thorpe, M., Weinbaum, S. y Yeager, J. 1997. Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *HortTechnology*, 7: 23–29.
- Shackel, K.A., Gurusinghe, S.H., Kester, D. y Micke, W. 1998. Water stress responses of almond [*Prunus dulcis* (Mill.) Webb.] trees under field conditions . *Acta Horticulturae*, 470: 390–316.
- Shackel, K.A., Lampinen, B., Sibbet, S. y Olson, W. 2000. The relation of midday stem water potential to the growth and physiology of fruit trees under water limited conditions. *Acta Horticulturae*, 537 (1): 425–430.
- Silveira, J.A.G., Melo, A.R.B., Viegas, R.A. y Oliveira, J.T.A. 2001. Salinity induced effects on nitrogen assimilation related to growth in cowpea plants. *Environmental and Experimental Botany* (46):171-179.
- Simonneau, T., Habib, R., Goutouly, J. y Huguet, J. 1993. Diurnal changes in stem diameter depend upon variations in water content: direct evidence in peach trees. *Journal of Experimental Botany*, 44: 615–621.
- Sinclair, T.R. y Allen, L.H.Jr. 1982. Carbon dioxide and water vapour exchange of leaves on field-growth citrus trees. *Journal of Experimental Botany*, 33: 1166–1175.
- Spreer, W., Nagle, M., Neidhart, S., Carle, R., Ongprasert, S. y Muller, J. 2007. Effect of regulated deficit irrigation and partial rootzone drying on the quality of mango fruits (*Mangifera indica* L., cv. ‘Chok Anan’). *Agricultural Water Management*, 88: 173–180.
- Sun, Z.H. y Ma, X.T. 1999. Thermostability of plasma membrane in citrus leaves. *Journal Huangzhong Agricultural*, 18: 375–377.

- Sun, H.Y., Liu, C.M., Zhang, X.Y., Shen, Y.J. y Zhang, Y.Q. 2006. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 85: 211–218.
- Swaef, de T., Steppe, K. y Lemeur, R. 2009 Determining reference values for stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in young apple trees based on plant responses to water deficit. *Agricultural Water Management*, 96: 541–550.
- Syvertsen, J.P. 1984. Partial acclimation in citrus leaves II. CO₂ assimilation and light, water and nitrogen use efficiency. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 109: 812–817.
- Syvertsen, J.P. y Salyani, M. 1991. Petroleum spray oil effects on net gas exchange of grapefruit leaves at various vapor pressures. *HortScience*, 26: 168–170.
- Tattini, M., Gucci, R., Romani, A., Baldi, A. y Everard, J.D. 1995. Growth, gas exchange and ion content in *Olea europaea* plants during salinity and subsequent relief. *Physiologia Plantarum*, 95: 203–210.
- Terradas, J., y Savé, R. 1992. The influence of Summer and Winter stress and water relationships on the distribution of *Quercus ilex* L. *Vegetatio*, 99–100: 137–145.
- Torrecillas, A., Ruiz Sánchez, M.C., Del Amor, F. y León, A. 1988. Seasonal variations on water relations of *Amygdalus-Communis* L under drip irrigated and non irrigated conditions. *Plant and Soil*, 106 (2): 215–220.
- Torrecillas, A., Ruiz Sánchez, M.C., León, A. y Del Amor, F. 1989. The response of young almond trees to different drip irrigated conditions development and yield. *Journal of Horticultural Science*, 64 (1): 1–7.
- Torrecillas, A., Alarcón, J.J., Domingo, R., Planes J., Sánchez-Blanco, M.J. 1996. Strategies for drought resistance in leaves of two almond cultivars. *Plant Science*, 118: 135–143

- Torrecillas, A., Domingo, R., Galego, R. y Ruiz-Sánchez, M.C. 2000. Apricot tree response to withholding irrigation at different phenological periods. *Scientia Horticulturae*, 85: 201–215.
- Turner, N.C. 1988 Measurement of Plant Water Status by the Pressure Chamber Technique. *Irrigation Science*, 9: 289–308.
- Turner, N.C. 1990. Plant water relations and irrigation management. *Agricultural Water Management*, 17: 59–73.
- Turner, N.C., Shackel, K.A. y Le Coultre, I.F. 2000. Leaf-cutter psychrometers: a cautionary note. *Agronomy Journal*, 92 (3): 538–541.
- Trimmer, W.L. y Hansen, H.J. 1994. Irrigation Scheduling. Extension Services of Oregon State University, Washington State University and University of Idaho. Publication PNW 288.
- Treeby, M.T., Henriod, R.E., Bevington, K.B., Milne, D.J. y Storey, R. 2007. Irrigation management and rootstock effects on navel orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) fruit quality. *Agricultural Water Management*, 91: 24–32.
- Tyree, M.T. y Jarvis, P.G. 1982. Water relations and carbon assimilation. *En: Lange, O.L., Nobel, P.S., Osmond, C.B. y Ziegler, H. (Eds) Physiological plant ecology II*. Springer, Berlin, Alemania, pp. 35–78.
- Tyree, M.T. y Sperry, J.S. 1988. Do woody plants operate near the point of catastrophic xylem dysfunction caused by dynamic water stress? Answers from a model. *Plant Physiology*, 88: 574–580.
- Vachaud, G., Vauclin, M. y Colombani, J. 1981. Bilan hydrique dans le sud-tunisien. *Journal of Hidrology*, 49: 31–73.
- Valancogne, C. y Nasr, Z. 1989. Measuring sap flow in the stem of small trees by a heat balance method. *HortScience*, 24: 383–385.
- Velez, J.E., Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2007. Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximum daily trunk shrinkage. *Agricultural Water Management*, 90: 197–204.

- Verreyne, J.S., Rabe, E. y Theron, K.I. 2001. The effect of combined deficit irrigation and summer trunk girdling on the internal fruit quality of 'Marisol' Clementines. *Scientia Horticulturae*, 91: 25–37.
- Villalobos, F.J., Mateos, L., Orgaz, F. y Fereres, E. 2002. Mundiprensa eds. Madrid, España. 496 pp.
- Vogt, K.U. 2001. Hydraulic vulnerability, vessel refilling, and seasonal courses of stem water potential of *Sorbus aucuparia* L. & *Sambucus nigra* L. *Journal of Experimental Botany*, 52: 1527–1536.
- Vu, J.C.V., Yelenosky, G. y Bausher, M.G. 1986. CO₂ exchange rate, stomatal conductance, and transpiration in attached leaves of 'Valencia' orange. *HortScience*, 21: 143–144.
- Vu J.C.V. y Yelenosky, G. 1987. Photosynthetic characteristics in leaves of 'Valencia' orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) grown under high and low temperature regimes. *Environmental and Experimental Botany*, 27: 279–287.
- Walker, R.R., Törökfalvy, E., Downton, W.J.S. 1982. Photosynthetic response of the citrus varieties *Rangpur lime* and *Etrog citron* to salt treatment. *Australian Journal of Plant Physiology*, 783–790.
- Walker, R.R., Törökfalvy, E., Grieve, A.M. y Prior, L.D. 1983. Water relations and ion concentrations of leaves on salt-stressed citrus plants. *Australian Journal of Plant Physiology*, 10: 265–277.
- Walker, R.R., Blackmore, D.H. y Sun, Qing. 1993. Carbon dioxide assimilation and foliar ion concentrations in leaves of lemon (*Citrus limon* L.) trees irrigated with NaCl or Na₂SO₄. *Australian Journal of Plant Physiology*, 20: 173–185.
- Williams, M., Rastetter, E.B., Fernandes, D.N., Goulden, M.L., Wofsy, S.C., Shaver, G.R., Melillo, J.M., Munger, J.W., Fan, S.M. y Nadelhoffer, K.J. 1996. Modelling the soil-plant-atmosphere continuum in a *Quercus-Hacer* stand at Harvard forest: the regulation of stomatal conductance by light, nitrogen and soil/plant hydraulic properties. *Plant Cell Environment*, 19: 911–927.

- Winkel, T. y Rambal S. 1993. Influence of Water Stress on Grapevines Growing in the Field: from Leaf to Whole-plant Response. *Australian Journal of Plant Physiology*, 20: 143–57.
- Wong, S.C., Cowan, I.R. y Farquar, G.D. 1979. Stomatal conductance correlates with photosynthetic capacity. *Nature*, 282: 424–426.
- Wu, Q. y Xia, R. 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi influence growth, osmotic adjustment and photosynthesis of citrus under well-watered and water stress conditions. *Journal of Plant Physiology*, 163: 417–425.
- Yoon, T.M. y Richter, H. 1990. Seasonal changes in stomatal responses of sweet cherry and plum to water status in detached leaves. *Physiologia Plantarum*, 80: 520–526.
- Zhang, F., Zhang, L.C. y Li, S.Y. 1995. Effect of high temperature stress on leaf photosynthesis of citrus during blossom and young fruit stage. *Acta Horticulturae*, 22: 11–150.
- Zhang, H. y Oweis, T. 1999. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 38: 195–211.
- Zweifel, R., Item, H. y Hasler, R. 2001. Link between diurnal stem radius changes and tree water relations. *Tree Physiology*, 21: 869–877.